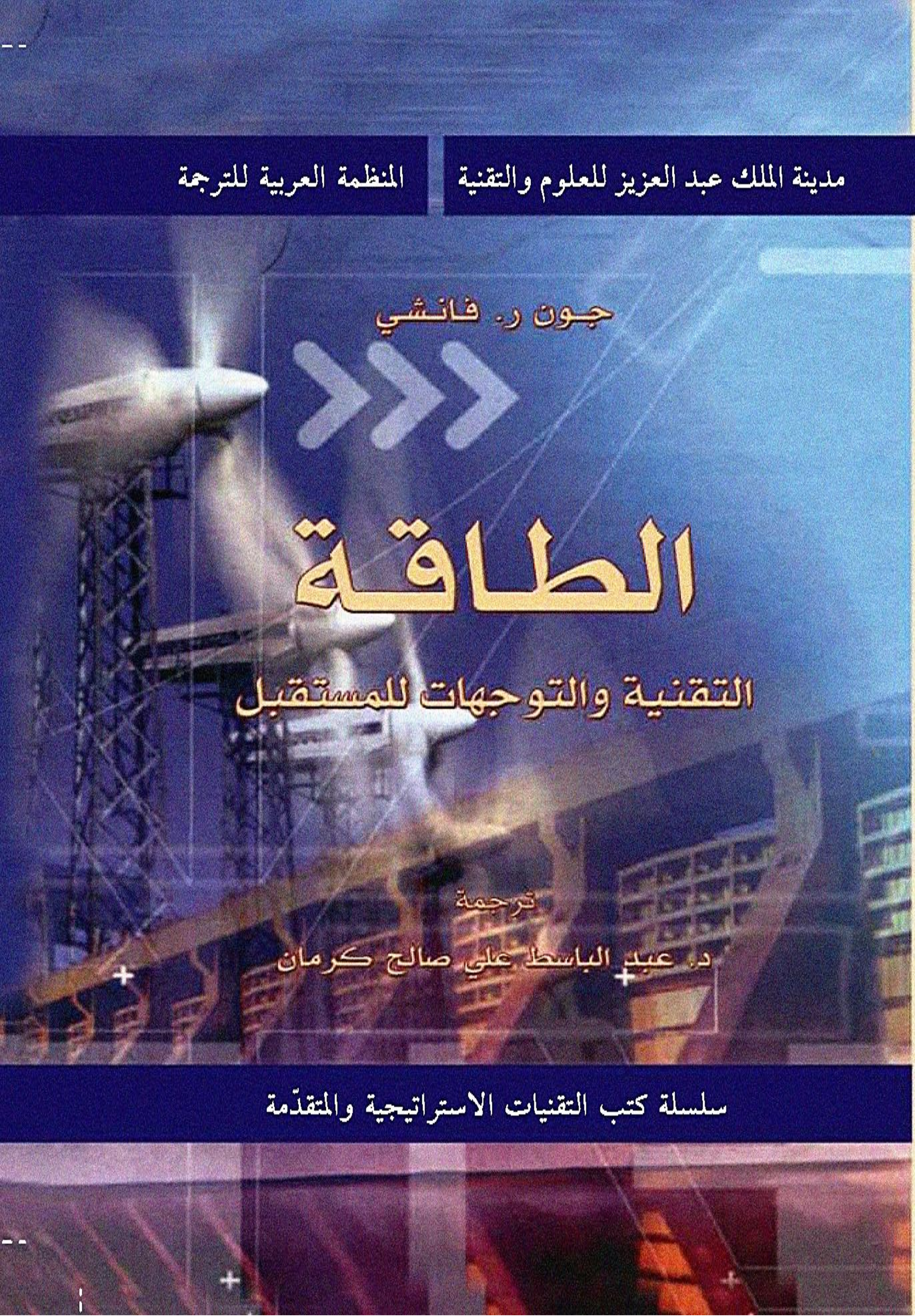


مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية
المنظمة العربية للترجمة

جون ر. فانشي

الطاقة

التقنية والتوجهات للمستقبل

ترجمة
د. عبد الباسط علي صالح كرمان

سلسلة كتب التقنيات الاستراتيجية والمتقدّمة

الطاقة

التقنية والتوجهات للمستقبل

اللجنة العلمية لسلسلة التقنيات الاستراتيجية والمتقدمة :

د. محمد مراياتي

د. منصور الغامدي

د. محمد الشيخلي

د. حسن الشريف

د. عبد الرحمن العريفي

د. حاتم النجدي

المنظمة العربية للترجمة

جون ر. فانشي

الطاقة

التقنية والتوجهات للمستقبل

ترجمة

د. عبد الباسط علي صالح كرمان

مراجعة

د. محمد عبد الستار الشيخلي

توزيع: مركز دراسات الوحدة العربية

الفهرسة أثناء النشر - إعداد المنظمة العربية للترجمة
فانشي، جون ر.
الطاقة: التقنية والتوجهات للمستقبل/ جون ر. فانشي؛ ترجمة عبد الباسط علي صالح كرمان؛ مراجعة محمد عبد الستار الشيخلي.
796 ص. - (تقنيات استراتيجية ومتقدمة - الطاقة؛ 3)
بيبليوغرافيا: ص 749 - 768.
يشتمل على فهرس.
ISBN 978-9953-0-1931-4
1. الطاقة - نقل وتوزيع. 2. الطاقة - أشكال. أ. العنوان. ب. كرمان، عبد الباسط علي صالح (مترجم). ج. الشيخلي، محمد عبد الستار (مراجع). د. السلسلة.
621.042

«الآراء الواردة في هذا الكتاب لا تعبّر بالضرورة
عن اتجاهات تتبناها المنظمة العربية للترجمة»

Fanchi, John R.
Energy: Technology and Directions for The Future
© 2004, Elsevier Inc. All Rights Reserved.
© جميع حقوق الترجمة العربية والنشر محفوظة حصراً لـ:

المنظمة العربية للترجمة
بناية «بيت النهضة»، شارع البصرة، ص. ب: 5996 - 113
الحمراء - بيروت 2090 1103 - لبنان
هاتف: 753031 - 753024 (9611) / فاكس: 753032 (9611)
e-mail: info@aot.org.lb - http://www.aot.org.lb

توزيع: مركز دراسات الوحدة العربية
بناية «بيت النهضة»، شارع البصرة، ص. ب: 6001 - 113
الحمراء - بيروت 2407 2034 - لبنان
تلفون: 750084 - 750085 - 750086 (9611)
برقياً: «مرعربي» - بيروت / فاكس: 750088 (9611)
e-mail: info@caus.org.lb - Web Site: http://www.caus.org.lb

الطبعة الأولى: بيروت، آذار (مارس) 2011

المحتويات

تقديم: سلسلة كتب التقنيات الاستراتيجية والمتقدمة ضمن مبادرة الملك عبد الله للمحتوى العربي 13

تمهيد 17

شكر وتقدير 23

الفصل الأول: المقدّمة 25

1.1 الوحدات والتحليل البُعدي 26

التحليل البُعدي 28

2.1 نبذة مختصرة عن تاريخ استهلاك الطاقة 29

3.1 استهلاك الطاقة ونوعية الحياة 31

4.1 الطاقة الميكانيكية 35

5.1 الديناميكا وتحَوّلات الطاقة 44

6.1 المتخصّصون في الطاقة 52

تعليقات ختامية 54

تمارين 55

الفصل الثاني: توليد وتوزيع الطاقة الكهربائية 59

1.2 التطوّر التاريخي للطاقة الكهربائية 59

2.2 الكهرومغناطيسية 67

3.2 عناصر دوائر التيار المتردد 75
4.2 توليد الطاقة الكهربائية 81
5.2 توزيع الطاقة الكهربائية 88
6.2 التوليد الموزَّع للطاقة 94
تعليقات ختامية 96
تمارين 98
الفصل الثالث: المحركات الحرارية والمبادِلات الحرارية 101
1.3 درجة الحرارة والتركيب 103
2.3 الأنظمة والحالات الديناميكية الحرارية 106
3.3 قوانين الديناميكا الحرارية 111
4.3 شروط الاتزان في غياب الجاذبية 115
5.3 المحركات الحرارية 119
6.3 انتقال الحرارة 124
7.3 المبادلات الحرارية 134
تعليقات ختامية 136
تمارين 137
الفصل الرابع: الأرض والطاقة الجيوحرارية 141
1.4 تشكُّل الأجسام السماوية 141
2.4 فرضية كنْت ـ لابلاس 144
3.4 نشأة الأرض البدائية 149
4.4 النشاط الإشعاعي 155
5.4 تكتونية الصفائح 160
6.4 الموائع في الأوساط المسامية 169
7.4 شروط الاتزان في وجود الجاذبية 176
8.4 الطاقة الجيوحرارية 180
تعليقات ختامية 187

تمارين 190
الفصل الخامس: منشأ الوقود الأحفوري 195
1.5 النماذج الذرية 196
2.5 علم الأحياء الجزيئية 208
3.5 ما هي الحياة؟ 215
4.5 التولُّد التلقائي 217
5.5 تجربة ميلر - يوري 219
6.5 التمثيل الضوئي 230
7.5 منشأ الوقود الأحفوري 235
تعليقات ختامية 239
تمارين 241
الفصل السادس: الطاقة الأحفورية 243
1.6 تاريخ الوقود الأحفوري 243
2.6 الفحم الحجري 247
3.6 الموائع البترولية 253
4.6 استكشاف البترول 261
5.6 إنتاج البترول 271
6.6 إدارة المكمن 280
7.6 الوقود الأحفوري غير التقليدي 288
تعليقات ختامية 291
تمارين 292
الفصل السابع: الطاقة الشمسية 297
1.7 الاندماج النووي: مصدر الطاقة الشمسية 298
2.7 عمر النجوم 305
3.7 الطاقة الشمسية 308
4.7 الطاقة الشمسية السلبية 314

5.7 الطاقة الشمسية الفعالة 319
6.7 محطات الطاقة الكهربائية الشمسية 324
تعليقات ختامية 328
تمارين 329
الفصل الثامن: تقنية الكهرباء الشمسية 333
1.8 مبدأ عدم اليقين لهايزنبرغ 333
2.8 تتامية بوهر وازدواجية الموجة ـ الجُسَيم 337
3.8 فكرة الاحتمالية لبورن 339
4.8 معادلة شرودنجر اللانسبية 345
5.8 شكلية تكامل المسار 353
6.8 الاختراق: ظاهرة ميكانيكية كمية 356
7.8 تفسير النظرية الكمية 359
8.8 الفولتضوئية 362
تعليقات ختامية 372
تمارين 373
الفصل التاسع: تحوّلات الكتلة ـ الطاقة 377
1.9 نسبية إينشتاين 378
2.9 اللاتغيُّرية، والتماثل، والنسبية 385
3.9 توضيح من فيزياء الجُسَيمات 389
4.9 التشتت 394
5.9 حديقة الجُسَيمات 402
6.9 الزمن 411
7.9 شكلية تكامل المسار النسبي 415
8.9 النظرية الكمية النسبية 418
9.9 النظرية الموحَّدة الكبرى ونظرية كل شيء 422
تعليقات ختامية 425

تمارين 426
الفصل العاشر : الاصطناع النووي 429
1.10 الكون المتسع 429
2.10 الأشعة الكونية 437
3.10 الأبعاد الفلكية 439
4.10 النموذج الكوني المعياري 444
5.10 المعاملات الكونية 450
6.10 الانفجار العظيم 457
تعليقات ختامية 465
تمارين 468
الفصل الحادي عشر : الطاقة النووية 471
1.11 تاريخ الطاقة النووية 471
2.11 الاستقرار والاضمحلال النووي 477
3.11 تطبيقات الطاقة النووية 483
4.11 توفر الوقود النووي 493
5.11 قضايا البيئة والسلامة 496
تعليقات ختامية 505
تمارين 506
الفصل الثاني عشر : الطاقة البديلة : الرياح والماء 509
1.12 الموائع المتحركة 510
2.12 الرياح 522
3.12 القدرة المائية 530
4.12 البحار والمحيطات 533
5.12 الكسيريات وحساب الأطوال الجغرافية 538
تعليقات ختامية 540
تمارين 541

الفصل الثالث عشر: الطاقة البديلة: الكتلة الحيوية والوقود الاصطناعي 545
1.13 النظرية الاصطناعية للنشوء 545
2.13 النشوء: تدرُّجية أم توازن متقطع؟ 549
3.13 نشأة الإنسان 554
4.13 التصنيف الحيوي الحديث 561
5.13 النماذج السكانية 564
6.13 المجموعات السكانية والاختلال 569
7.13 الكتلة الحيوية 572
8.13 الوقود الاصطناعي 580
تعليقات ختامية 585
تمارين 587
الفصل الرابع عشر: الطاقة والاقتصاد والبيئة 593
1.14 حفظ الطاقة والتوليد المشترك للطاقة 593
2.14 الطاقة والبيئة 596
3.14 الاقتصاد 600
4.14 تحليل دورة الحياة 605
5.14 التنمية المستدامة: فكرة مقنعة 610
6.14 الطاقة والأخلاقيات 618
7.14 الطاقة والجغرافيا السياسية 619
تعليقات ختامية 624
تمارين 625
الفصل الخامس عشر: مزيج طاقة القرن الحادي والعشرين 633
1.15 الهيدروجين وخلايا الوقود 633
2.15 اقتصاد الهيدروجين 642
3.15 خلاصة خيارات الطاقة 645

4.15 منهجيات التنبؤ والتوقعات 650
5.15 ماذا يخبئ المستقبل؟ 660
تعليقات ختامية 661
تمارين 662
الملاحق 667
الثبت التعريفي 677
ثبت المصطلحات (عربي - إنجليزي) 707
(إنجليزي - عربي) 729
المراجع 749
بعض الأخطاء في النسخة الإنجليزية للكتاب التي تم تصحيحها
في الترجمة العربية 769
الفهرس 773

تـقـديـم

سلسلة كتب التقنيات الاستراتيجية والمتقدمة

ضمن مبادرة الملك عبد الله للمحتوى العربي

يطيب لي أن أقدم لهذه السلسلة التي جرى انتقاؤها في مجالات تقنية ذات أولوية للقارئ العربي في عصر أصبحت فيه المعرفة محركاً أساسياً للنمو الاقتصادي والتقني، ويأتي نشر هذه السلسلة بالتعاون بين مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية والمنظمة العربية للترجمة ويقع في إطار تلبية عدد من السياسات والتوصيات التي تعنى باللغة العربية والعلوم، ومنها:

أولاً: البيان الختامي لمؤتمر القمة العربي المنعقد في الرياض 1428هـ ـ 2007 م الذي يؤكد على ضرورة الاهتمام باللغة العربية، وأن تكون هي لغة البحث العلمي والمعاملات حيث نص على ما يأتي: (وجوب حضور اللغة العربية في جميع الميادين بما في ذلك وسائل الاتصال، والإعلام، والإنترنت وغيرها).

ثانياً: «السياسة الوطنية للعلوم والتقنية» في المملكة العربية السعودية التي انبثق منها اعتماد إحدى عشرة تقنية إستراتيجية هي: المياه، والبترول والغاز، والبتروكيميائيات، والتقنيات المتناهية الصغر

(النانو)، والتقنية الحيوية، وتقنية المعلومات، والإلكترونيات والاتصالات والضوئيات، والفضاء والطيران، والطاقة، والمواد المتقدمة، والبيئة.

ثالثاً: مبادرة الملك عبد الله للمحتوى العربي التي تُفعِّل أيضاً ما جاء في أولاً عن حضور اللغة العربية في الإنترنت، حيث تهدف إلى إثراء المحتوى العربي عبر عدد من المشاريع التي تنفذها مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية بالتعاون مع جهات مختلفة داخل المملكة وخارجها. ومن هذه المشاريع ما يتعلق برقمنة المحتوى العربي القائم على شكل ورقي وإتاحته على شبكة الإنترنت، ومنها ما يتعلق بترجمة الكتب المهمة، وبخاصة العلمية، ما يساعد على إثراء المحتوى العلمي بالترجمة من اللغات الأخرى إلى اللغة العربية بهدف تزويد القارئ العربي بعلم نافع مفيد.

تشتمل السلسلة على ثلاثة كتب في كل من التقنيات التي حددتها «السياسة الوطنية للعلوم والتقنية». واختيرت الكتب بحيث يكون **الأول** مرجعاً عالمياً معروفاً في تلك التقنية، ويكون **الثاني** كتاباً جامعياً، **والثالث** كتاباً عاماً موجهاً لعامة المهتمين، وقد يغطي كتاب واحد أو أكثر كل ذلك مجتمعاً. وعليه، تشتمل سلسلة كتب التقنيات الاستراتيجية والمتقدمة على ما مجموعه ثلاثة وثلاثين كتاباً مترجماً، كما خُصِّص كتاب إضافي منفرد للمصطلحات العلمية والتقنية المعتمدة في هذه السلسلة كمعجم للمصطلح.

ولقد جرى انتقاء الكتب وفق معايير عدة، منها أن يكون الكتاب من أمهات الكتب في تلك التقنية، ولمؤلفين يُشهد لهم عالمياً، وأنه قد صدر بعد عام 2000، وأن لا يكون ضيق الاختصاص بحيث يخاطب فئة محدودة، وأن تكون النسخة التي يترجم عنها مكتوبة باللغة التي ألّف بها الكتاب وليست مترجمة عن

لغة أخرى، وأخيراً أن يكون موضوع الكتاب ونهجه عملياً تطبيقياً يصب في جهود نقل التقنية والابتكار ويساهم في عملية التنمية الاقتصادية من خلال زيادة المحتوى المعرفي العربي.

إن مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية سعيدة بصدور هذه المجموعة من الكتب، وأود أن أشكر المنظمة العربية للترجمة على الجهود التي بذلتها لتحقيق الجودة العالية في الترجمة والمراجعة والتحرير والإخراج، وعلى حسن انتقائها للمترجمين المتخصصين، وعلى سرعة الإنجاز، كما أشكر اللجنة العلمية للمجموعة التي أنيط بها الإشراف على انجازها في المنظمة وكذلك زملائي في مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية الذين يتابعون تنفيذ مبادرة الملك عبد الله للمحتوى العربي.

الرياض 20/ 3/ 1431 هـ

رئيس مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية

د. محمد بن إبراهيم السويل

تمهيد

يقدم كتاب **الطاقة: التقنية والتوجهات للمستقبل** *(Energy: Technology and Directions for the Future)* أساسيات الطاقة للعلماء والمهندسين. ويرى هذا الكتاب بأن اعتماد المجتمع على الطاقة الأحفورية في مطلع القرن الحادي والعشرين هو في حالة انتقال إلى مزيج أوسع للطاقة. وتبيّن التنبؤات لمزيج طاقة القرن الحادي والعشرين بأن هناك مجموعة من السيناريوهات المحتملة. وأكثر السيناريوهات احتمالاً يتوقع استخدام عدد من مصادر الطاقة المختلفة. وسيحتاج المتخصصون المستقبليون في الطاقة إلى فهم أصل وتفاعلات هذه المصادر للطاقة للازدهار في صناعة الطاقة الناشئة من صناعة سائدة بالوقود الأحفوري إلى صناعة تستعمل العديد من مصادر الطاقة.

كتاب **الطاقة: التقنية والتوجهات للمستقبل** هو مسح لمصادر الطاقة التي ستكون متوفرة في هذا القرن. وهو مصمم ليساعد القارئ على فهم وتقدير دور مكونات الطاقة البديلة في مزيج الطاقة. لتحقيق هذا الهدف، سيتعرف القارئ على تاريخ وعلم مصادر الطاقة بالإضافة إلى تكنولوجيا الطاقة. والإلمام بالمادة المقدمة في هذا الكتاب سيساعد القارئ على أن يقيّم، بشكل أفضل، قابلية تطبيق

تقنيات الطاقة الصاعدة والدور الذي ستؤدّيه هذه التقنيات في المستقبل.

نطاق الكتاب

يبدأ كتاب **الطاقة: التقنية والتوجهات للمستقبل** بتقديم الخلفية التاريخية لطاقة القرن الحادي والعشرين، ويقدّم بعدها مفهوم تحوّلات الطاقة. يناقش الكتاب بعد ذلك النظام الحديث لتوزيع الطاقة في صورة كهرباء، يليه استعراض لمفاهيم الحرارة والديناميكا الحرارية. هذه الخلفية تمهّد لدراسة أنواع معيّنة للطاقة.

النوع الأول للطاقة الذي سيتم دراسته هو الطاقة الجيوحرارية. تتيح لنا هذه الدراسة تقديم المفاهيم الأساسية للجيولوجيا وتشكُّل الكواكب تحسُّباً لدراستنا للوقود الأحفوري. ومناقشتنا للجيولوجيا وتشكُّل الكواكب تشرح مصدر الطاقة الجيوحرارية وتوضح الطريقة التي نتبعها لتقديم مصدر للطاقة في الخلفية الواسعة من النظريات الرائدة في العديد من مجالات العلوم ذات الصلة. من بين هذه النظريات النظرية الكونية للانفجار العظيم، وفرضية كنْت ـ لابلاس (Kant-Laplace)، وتكتونية الصفائح، وفرضية أوبارين ـ هالداين (Oparin-Haldane) عن أصل الحياة، والنظرية الاصطناعية للنشوء. هذه النظريات تقدِّم الخلفية التي ستساعد القارئ على فهم الأفكار السائدة الموجودة، وتهيّئه لتقييم النظريات المتنافسة التي قد تصبح هامة في حياته المهنية.

بعد الانتهاء من دراسة الطاقة الجيوحرارية، نقوم بدراسة الوقود الأحفوري، الذي يقدِّم معظم الطاقة المستهلكة اليوم. يتبع ذلك مناقشة عن الطاقة الشمسية، والطاقة النووية، والطاقة البديلة (الرياح، والمياه، والكتلة الحيوية، والوقود الاصطناعي)، ومن ثم

الهيدروجين. وفي العديد من الحالات، مثل معركة التيارات، وتطور الصناعة النفطية الحديثة، واكتشاف وتطوير الطاقة النووية، تُستخدم الخلفية التاريخية للتكنولوجيا لوضع المادة التقنية في سياق اجتماعي. سيتعرف القارئ إلى دور الطاقة في المجتمع، بما في ذلك الاعتبارات الاقتصادية، والأخلاقية، والبيئية. والموضوع الأخير هو مناقشة لتوقعات الطاقة والتوجه نحو اقتصاد الهيدروجين.

الأفكار الرئيسية والخصال

إن كتاب **الطاقة: التقنية والتوجهات للمستقبل** مُقدّم كمجموعة من الوحدات بأفكار رئيسية. تتضمن الأفكار الرئيسية: توزيع الكهرباء، والطاقة الجيوحرارية، والوقود الأحفوري، والطاقة الشمسية، والطاقة البديلة، واقتصاد الهيدروجين، والطاقة والمجتمع، وتوقعات الطاقة. المستوى التقني للتقديم يفترض بأن القرّاء قد أكملوا دراسة الفيزياء على مستوى الكلية مع التفاضل والتكامل والرياضيات إلى حساب التفاضل والتكامل لعدة متغيرات. باشتراط هذا المستوى من الإعداد، من الممكن تقديم مناقشة أكثر تعقيداً لمواضيع الطاقة.

وتتخلل الخصال التقنية الأفكار الرئيسية للوحدات للمساعدة على تهيئة القارئ لأكثر المفاهيم تعقيداً. على سبيل المثال، تم تقديم دالة لاغرانج في الاستعراض المتعلق بتحولات الطاقة، وبعد ذلك استُخدِمت لمناقشة تطور وتفسير ميكانيكا الكم وميكانيكا الكم النسبية باستخدام تكاملات المسار. وتم استخدام ميكانيكا الكم لمساعدة القارئ على فهم الاختراق (كما في الاضمحلال النووي)، ولشرح نظرية الإلكترون الحر في الفلزّات. وهذه النظرية مفيدة لمناقشة الظاهرة الكهروضوئية والفولتضوئية، اللتين لهما تطبيقات في الطاقة الشمسية. وتم تقديم ميكانيكا الكم النسبية لمساعدة القارئ على فهم

مفهوم تحوّل الكتلة ـ الطاقة وتطوير معرفة أكثر رِفعة للاصطناع النووي والطاقة النووية (الاندماجية والانشطارية). استخدام الخصال التقنية تتيح للقارئ أن يصبح ملمّاً بالمفاهيم العلمية السائدة، والأفكار الرئيسية التقنية توضح أهمية كل خيار للطاقة في سياق اجتماعي واسع.

الرياضيات

إن تركيز كتاب **الطاقة: التقنية والتوجهات للمستقبل** هو على المفاهيم، والحقائق، والتمارين التي يمكن حلها من دون رياضيات متقدمة. وتم تضمين تمارين في الكتاب لتكون متممة للنص وتعزز من قيمته ككتاب تدريسي. وتتفاوت التمارين في الصعوبة من تدريب على تحويل الوحدات أو التحقق من مادة في الكتاب إلى تحليلات لمسائل متعددة الجوانب. والعديد من هذه التمارين ترشد القارئ إلى تحليل مفصّل للسمات الهامة لقضايا الطاقة المعاصرة. وبشكل عام، تم تضمين إحصائيات الطاقة بشكل أساسي في التمارين وفي النص من أجل الرؤية التاريخية.

يحتوي كتاب **الطاقة: التقنية والتوجهات للمستقبل** على أقسام تفترض بأن القارئ قد أكمل دراسة التفاضل والتكامل على مستوى الكلية. وعند تقديم رياضيات جديدة، مثل تعريف الاحتمال الشرطي أو اصطلاح إينشتاين الجمعي، فإنه يتم تقديمه على مستوى مناسب للقرّاء الذين لديهم خلفية بالتفاضل والتكامل. على سبيل المثال، سيتعرض القرّاء إلى معادلات تفاضلية، إلا أنه لا يُتوقع منهم حلها. وإذا تطلب الأمر حلاً لمعادلة تفاضلية لحل مسألة، فإنه سيتم تقديم الحل. وفي بعض التمارين، يُطلب من القرّاء تعويض الحل في معادلة للتحقق من صحتها. كمثال آخر، تُستخدَم التكاملات لتوضيح

كيفية الحصول على المعادلة الأساسية لميكانيكا الكم. سيتم تقديم حلول التكاملات.

مستوى الرياضيات المستخدم في كتاب **الطاقة: التقنية والتوجهات للمستقبل** يسهّل التعرض المتقدم للعديد من المواضيع من دون تجاوز مستوى إعداد القرّاء المتخصصين في المواضيع التقنية. في الواقع، يمكن استخدام الرياضيات لإنعاش المعرفة الرياضية للقارئ. وإذا كانت لدى القرّاء رغبة لمزيد من الإعداد في الرياضيات، يمكنهم الرجوع إلى كتب الرياضيات الدراسية العادية أو إلى كتاب **منعش الرياضيات للعلماء والمهندسين** (***Math Refresher for Scientists and Engineers***)، الطبعة الثانية، من تأليف مؤلف هذا الكتاب ونشر Wiley-Interscience في عام 2000.

جمهور المتخصصين

إن كل متخصص في الطاقة سيتعرّض للمادة المقدمة في كتاب **الطاقة: التقنية والتوجهات للمستقبل**. وقد تم تصميم المواضيع لتزويد المتخصص في الطاقة بمدخل إلى اللغة، والمفاهيم، والتقنيات المستخدمة في جميع مكوّنات الطاقة الرئيسية التي من المتوقع أن تساهم في مزيج طاقة القرن الحادي والعشرين. الإلمام بالمادة المقدمة في الكتاب ستسهل المناقشات بين المتخصصين في الطاقة بمختلف تخصصاتهم.

كلمة إلى عضو هيئة التدريس

إن هذا الكتاب مناسب كمرجع أساسي أو إضافي لمقررات الدراسة المسحية للطاقة. وقد استخدمت الكتاب كمقرر ذي ثلاث ساعات أسبوعية (48 ساعة فصلية تقريباً). وهذا المقرر مصمم ليساعد

طلاب المرحلة الجامعية وطلاب الدراسات العليا على توسيع معرفتهم بالاستحقاقات المتعلقة بمصادر الطاقة المختلفة، واختيار مصدر للطاقة للدراسة المتخصّصة. ومقرّرات الدراسة المسحية للطاقة بهذا المستوى يمكن تدريسها من قِبَل فريق من أعضاء هيئة التدريس أو عضو هيئة تدريس الذي يمكن دعمه بمتحدثين زائرين. وتنوّع المواضيع تقدم خلفية مناسبة للمناقشات الرفيعة المستوى نسبياً داخل القاعة الدراسية. ويمكن تجاوز بعض المواد في الكتاب بالقراءة الأولية إذا كان لديك زمنٌ محدّدٌ أو أنك تفضّل إضافة مواضيعك الخاصة. على سبيل المثال، الفصل العاشر هو فصل خصب يغطي الاصطناع النووي ويمكن تجاوزه أو تركه لطلاب المستويات المتقدمة.

شكر وتقدير

أود أن أتقدم بالشكر إلى طلابي والمتحدثين الزائرين على ملاحظاتهم القيّمة حول الكتاب. وقد تعاون قسم الهندسة البترولية بمدرسة كولورادو للمناجم بالتمويل لتطوير فكرة المقرر. أما زملائي من الأقسام الأخرى فقد شجعوا تطوير مقرر الدراسة المسحية للطاقة. كما أود أن أتقدم بالشكر إلى كاثي فانشي وتوني فانشي على دعمهما وجهودهما في إنتاج هذا الكتاب. وبالطبع، أنا المسؤول عن أيّ خطأ أو إغفال وسأقدِّر أيّ تعليق قد يبديه القارئ.

جون ر. فانشي

تشرين الأول/ أكتوبر 2003

الفصل الأول

المقدّمة

من المتوقع أن يزداد الطلب على الطاقة في القرن الحادي والعشرين بسبب سعي المزيد من البلدان للبحث عن نوعية حياة أفضل لمواطنيها. وسيتم تلبية الطلب على الطاقة بمزيج طاقة (Energy Mix) عالمي يمر انتقالاً من تشكيلة طاقة سائدة متمثلة بالوقود الأحفوري إلى تشكيلة طاقة تشمل عدداً من أنواع الوقود. الوقود الأحفوري، مثل الفحم الحجري، والنفط، والغاز، كانت من أنواع الوقود المفضلة خلالَ النصف الأخير من القرن العشرين. والتوقعات لمزيج طاقة القرن الحادي والعشرين تُظهِر انتقالاً تدريجياً من السيادة الحالية للوقود الأحفوري إلى توزيع أكثر توازناً لمصادر الطاقة. سيتم مناقشة التوقعات بالتفصيل في الفصل الخامس عشر.

يقدّم هذا الفصل تاريخ استهلاك الطاقة، ويوضح أهمية الطاقة على نوعية حياة الإنسان، كما يقدّم مفاهيم الطاقة وتحوّلات الطاقة في الميكانيكا الكلاسيكية، ويناقش مدى الحاجة إلى متخصّصين في الطاقة للعمل كأوصياء على موارد الأرض الطبيعية.

1.1 الوحدات والتحليل البُعدي

يمكن التعبير عن الطاقة بوحدات قياس عديدة مختلفة، بدءاً من الوحدة الحرارية البريطانية (British Thermal Unit (BTU)) في النظام الإنجليزي إلى الإرج (erg) في النظام سنتيمتر- غرام - ثانية (cgs) والجول (Joule) في النظام الدولي للوحدات (System Internationale (SI)). وقد اخترنا في هذا الكتاب النظام الدولي (SI) كنظام رئيسي للوحدات بسبب استخدامه عالمياً في العلوم وأيضاً لتسهيل عملية المقارنة بين مختلف مصادر الطاقة.

الوحدات الأساسية في نظام الوحدات SI

يبيّن الجدول (1.1) الوحدات الأساسية ورموزها في نظام الوحدات SI. ويمكن اشتقاق جميع الوحدات الأخرى من هذه الوحدات الأساسية.

من الأمثلة على الوحدات المشتقة هو الجول (J). والجول في نظام الوحدات SI هو وحدة قياس الطاقة. والطاقة كمية مشتقة، حيث $1J = 1\ kg.\ m^2/s^2$. والواط (Watt (W)) وحدة قياس القدرة في نظام الوحدات SI، حيث $1\ W = 1\ J/s$. وهناك وحدة أخرى مشتقة مستعملة هي الواط/ متر^2 ($Watt/m^2$) وهي وحدة الشدة الشمسية (Solar Intensity). تقيس الشدة الشمسية مقدار الطاقة الشمسية المارة خلال مساحة مقطع في فترة زمنية معيّنة. والطاقة الشمسية هي طاقة الضوء القادم من الشمس. فمثلاً، واحد واط/ متر^2 يساوي جول واحد من الطاقة المارة خلال واحد متر مربع في الثانية الواحدة. ويمكن استخدام وحدة الواط/ متر^2 للمقارنة بين أنواع الطاقة المختلفة، كما هو موضّح في العديد من التمارين في هذا الكتاب.

الجدول (1.1)

الوحدات الأساسية في نظام الوحدات SI

الكمية الفيزيائية	الوحدة الأساسية	الرمز
الطول	متر (meter)	m
الكتلة	كيلوغرام (kilogram)	kg
الزمن	ثانية (second)	s
التيار الكهربائي	أمبير (ampere)	A
درجة الحرارة	كلفن (Kelvin)	K
كمية المادة	جزيء غرامي (مول) (mole)	mol
شدة الإضاءة	شمعة (candela)	cd

إن الكميات الفيزيائية ذات أهمية هنا، ولها قيَم تتراوح ما بين الصغيرة جداً إلى الكبيرة جداً. لذلك، من الضروري استخدام ترميز علمي للتعبير عن قيَم العديد من الكميات الفيزيائية التي نقابلها في دراسة الطاقة. في بعض الحالات، يمكن التعبير عن القيمة بشكل متعارف عليه وذلك باستخدام بادئات. والبادئات الشائعة المستخدَمة في نظام الوحدات SI مبيّنة في الجدول (2.1).

الجدول (2.1) البادئات الشائعة في نظام الوحدات SI

العامل	البادئة	الرمز	العامل	البادئة	الرمز
10^{1}	ديكا (deka)	da	10^{-1}	ديسي (deci)	d
10^{2}	هيكتو (hecto)	h	10^{-2}	سنتي (centi)	c
10^{3}	كيلو (kilo)	k	10^{-3}	ميللي (milli)	m
10^{6}	ميغا (mega)	M	10^{-6}	ميكرو (micro)	μ
10^{9}	جيغا (giga)	G	10^{-9}	نانو (nano)	n
10^{12}	تيرا (tera)	T	10^{-12}	بيكو (pico)	p
10^{15}	بيتا (peta)	P	10^{-15}	فمتو (femto)	f
10^{18}	إكزا (exa)	E	10^{-18}	أَتّو (atto)	a

نستخدم في بعض أجزاء هذا الكتاب، وحدات من أنظمة وحدات أخرى، إذا كانت مماثلة للوحدات التي ستقابلها في المؤلفات العلمية. فمثلاً، المحتوى الطاقي للغذاء يُعبَّر عنه غالباً بالسُعرات الغذائية (Calories)، حيث واحد سُعر غذائي يكافئ 1000 سُعر حراري (Calorie) أو 4.184×10^3 J (أي إن 1000 = سعر غذائي 1). وهناك وحدة أخرى هامة هي الكُوَاد (Quad). والكُوَاد هو وحدة قياس الطاقة، ويستخدم غالباً في المناقشات المتعلقة بالطاقة العالمية لأنها قابلة للمقارنة من حيث القيمة بالقيم العالمية للطاقة. وواحد كُواد يساوي واحد كوادريليون وحدة حرارية بريطانية (10^{15} BTU أو تقريباً 10^{18} J).

سيكون من الأسهل الإلمام بالطاقة والمقارنة بين مختلف أنواع الطاقة إذا استخدم كل منّا نظاماً واحداً للوحدات، إلا أن استخدام وحدات مختلفة للطاقة هو الشائع. معظم تمارين الكتاب وُضعت بحيث تساعدك على تحسين مهاراتك في التحويل من نظام معيّن للوحدات إلى نظام آخر. ويحتوي الملحق (ج) على مجموعة من معاملات تحويل الوحدات التي ستساعدك في إكمال حل التمارين. ويمكن الحصول على مجموعة كاملة من معاملات التحويل في المؤلفات العلمية.

التحليل البُعدي

يمكن التعبير عن بُعد أيّ كمية بدلالة نظام الوحدات الأساسية SI المبيّنة في الجدول (1.1). وفي العديد من الحالات، يمكن إجراء تحويل الوحدات بين مختلف أنظمة الوحدات أو حل أيّ مسألة بسهولة بالغة جداً وذلك بتحليل أبعاد الكميات الفيزيائية. وأكثر الطرق فاعلية لتفادي الأخطاء العرَضية في الوحدات هي كتابة كلٍّ من قيمة ووحدة كل كمية فيزيائية ذات صلة بالحسابات بعناية.

2.1 نبذة مختصرة عن تاريخ استهلاك الطاقة

لقد ازداد استهلاك الطاقة مع رقيّ المجتمع. ويبيّن الجدول (3.1) تقديراً للاستهلاك البشري اليومي من الطاقة لستة عصور من التطور الاجتماعي الحضاري كوك 1971 (Cook). افترض كوك أن المصدر الوحيد للطاقة المستهلكة من الإنسان خلال العصر المسمّى «البدائي» كان الغذاء. وتقدير كوك للطاقة كان لإنسان شرق أفريقيا الذي عاش قبل حوالي مليون سنة. الطاقة ضرورية للحياة، وكان الغذاء المصدر الأول للطاقة. ويحتاج البشر تقريباً 2000 سُعر غذائي ($\approx$8MJ) من الغذاء في اليوم الواحد.

إن القدرة على التحكم بالنار خلال العصر المسمّى بعصر «الصيد» جعلت الناس تستخدم الحطب للتدفئة والطبخ. قدّمت النار الضوء في الليل كما استطاعت أن تنير الكهوف. وكان الحطب مصدر الطاقة الأول للاستهلاك في الأماكن السكنية. تقدير كوك للطاقة كان لأوروبا قبل حوالي 100,000 سنة.

تميّز عصر «الزراعة البدائية» باستئناس الحيوانات. كان البشر قادرين على استعمال الحيوانات لمساعدتهم في زراعة المحاصيل وحرث حقولهم. والقدرة على زرع غذاء أكثر مما كانوا يحتاجون إليه أصبحت حافزاً لخلق صناعة زراعية. تقدير كوك للطاقة كان للهلال الخصيب حوالي عام 5000 قبل الميلاد.

وتم استهلاك المزيد من الطاقة خلال عصر «الزراعة المتقدمة» عندما عرف الناس استخدام الفحم الحجري وبناء الآلات لاستغلال الرياح والمياه. وبحلول أوائل عصر النهضة، استخدم الناس الرياح لدفع السفن الشراعية، والمياه لتشغيل الطواحين، والغابات والفحم الحجري لتوليد الحرارة. وأصبح النقل عاملاً هاماً لاستهلاك الطاقة

من قِبَل الإنسان. تقدير كوك للطاقة كان لشمال غرب أوروبا حوالي عام 1400 بعد الميلاد.

الجدول (3.1) استهلاك الطاقة تاريخياً

العصر	نصيب الفرد من الاستهلاك اليومي (1000 kcal)				
	غذاء	منزل وتجارة	صناعة وزراعة	نقل	الإجمالي
البدائي	2				2
الصيد	3	2			5
الزراعة البدائية	4	4			12
الزراعة المتقدمة	6	12	7	1	26
الصناعة	7	32	24	14	77
التكنولوجيا	10	66	91	63	230

المصدر: Cook, 1971.

واكَب المحرّك البخاري عصر «الصناعة»، وقدّم وسائل لتحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة ميكانيكية. كان الخشب مصدر الطاقة الأول لتوليد البخار في المحركات البخارية. وحَلّ الفحم الحجري، وهو وقود أحفوري، في النهاية محل الخشب والقش بوصفه المصدر الأساسي للطاقة في الدول الصناعية. والفحم الحجري أسهل للتخزين والنقل من الخشب والقش، لكبر حجمهما وصعوبة التعامل معهما. كان الفحم الحجري مفيداً كمصدر وقود لوسائل النقل الكبيرة، مثل القطارات والسفن، لكنه كان محدود الاستخدام لوسائل النقل الشخصية. النفط، وهو وقود أحفوري آخر، كان السائل الذي احتوى على الكمية نفسها تقريباً من الطاقة لكل وحدة كتلة، كالفحم الحجري، لكنه استطاع أن يتدفق من خلال خطوط الأنابيب وفي الخزّانات. كان الناس فقط بحاجة إلى آلة لتحويل الطاقة في النفط إلى شكل أكثر فائدة. تقدير كوك للطاقة كان لإنجلترا حوالي عام 1875 بعد الميلاد.

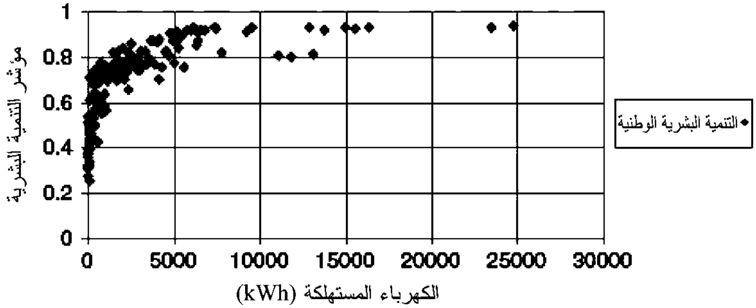
يرتبط عصر «التكنولوجيا» الحديث بتطوير محركات الاحتراق الداخلي والتطبيقات الكهربائية. ومحركات الاحتراق الداخلي يمكن أن تتفاوت كثيراً في الحجم كما إنها تستخدم النفط. ويمكن تحجيم محرك الاحتراق الداخلي بحيث يُثبَّت على عربة لصناعة «عربات بلا أحصنة». ونظام النقل المستخدم اليوم تطور نتيجة التطوُّر في محركات الاحتراق الداخلي. أما الكهرباء، مقارنةً بذلك، فيتم توليدها من مصادر طاقة أساسية مثل الوقود الأحفوري. وأنظمة توليد وتوزيع الكهرباء أدت إلى إمكانية الاستخدام الواسع للمحركات الكهربائية والأنوار الكهربائية. وإحدى ميزات الكهرباء كمصدر للطاقة هو أنه يمكن نقلها بسهولة إلا أنه من الصعب تخزينها. تقدير كوك للطاقة كان للولايات المتحدة حوالي عام 1970 بعد الميلاد.

3.1 استهلاك الطاقة ونوعية الحياة

إن العلاقة بين استهلاك الطاقة ونوعية الحياة منشورة في المؤلفات العلمية. ونوعية الحياة مفهوم ذاتي يمكن قياسه بطرق عديدة. تقوم الأمم المتحدة بحساب مقدار يسمى دليل التنمية البشرية (Human Development Index (HDI)). لتحديد مقياس كمي لنوعية الحياة. ودليل التنمية البشرية يقيس التنمية البشرية في الدولة باستخدام ثلاث فئات: متوسط العمر المتوقَّع، والثقافة، والناتج المحلي الإجمالي (Gross Domestic Product (GDP)). يمثِّل الناتج المحلي الإجمالي النتاج الكلي من السلع والخدمات للدولة وهو مقياس للنمو الاقتصادي للدولة. ودليل التنمية البشرية كسر يتراوح قيمته بين الصفر والواحد الصحيح. وقيمة دليل التنمية البشرية المقاربة من الصفر تمثِّل نوعية حياة منخفضة نسبياً، أما القيمة المقاربة من الواحد الصحيح فتمثِّل نوعية حياة عالية.

دليل التنمية البشرية للأمم المتحدة مقابل صافي نصيب الفرد

من الكهرباء المستهلكة – بيانات عام 1999



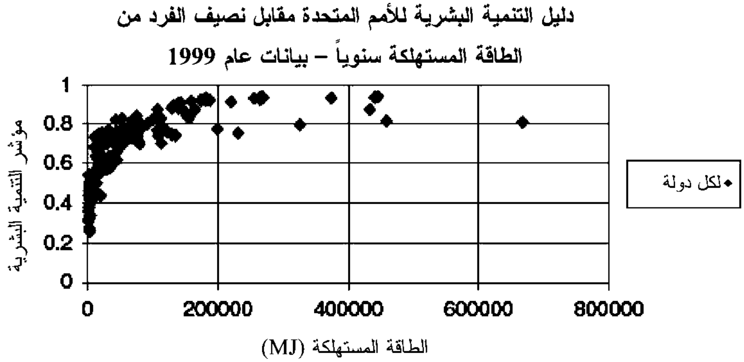
الشكل (1.1): التنمية البشرية والاستهلاك السنوي للكهرباء

يبيّن الشكل (1.1) رسماً بيانياً لدليل التنمية البشرية مقابل نصيب الفرد من استهلاك الكهرباء لجميع الدول التي يبلغ عدد سكانها، في الأقل، مليون نسمة. نصيب الفرد من استهلاك الكهرباء يساوي إجمالي كمية الكهرباء المستهلكة من قِبَل الدولة مقسوماً على عدد سكان الدولة. وهو يمثل متوسط كمية الكهرباء المستهلكة بواسطة كل فرد في الدولة. وحساب استهلاك الفرد من الكهرباء يؤسس قاعدة مشتركة للمقارنة بين استهلاك الكهرباء في الدول ذات التعداد السكاني الكبير والدول ذات التعداد السكاني الصغير. بيانات دليل التنمية البشرية في الشكل السابق هي بيانات عام 1999 من تقرير الأمم المتحدة للتنمية البشرية لعام 2001 [برنامج الأمم المتحدة الإنمائي (UNDP)، 2001]، وبيانات نصيب الفرد من الاستهلاك السنوي للكهرباء هي بيانات عام 1999 من تقرير إدارة معلومات الطاقة التابعة لوزارة الطاقة الأميركية [إدارة معلومات الطاقة (EIA)، الجدول 2.6، 2002].

كما يبيّن الشكل (1.1) أن نوعية الحياة، كما يقيسها دليل التنمية البشرية، تزداد مع زيادة استهلاك الفرد من الكهرباء. ويبيّن أيضاً أن

الزيادة ليست خطية؛ ويبدأ التحسن في نوعية الحياة بالاستقرار عندما يرتفع استهلاك الكهرباء للفرد إلى نحو 4000 kWh. ويمكن إعداد علاقة بيانية مماثلة لاستهلاك الفرد من الطاقة (الشكل 2.1).

يبيّن الشكل (2.1) رسماً بيانياً لاستهلاك الفرد من الطاقة مقابل دليل التنمية البشرية في جميع الدول التي يبلغ عدد سكانها، في الأقل، واحد مليون نسمة. بيانات دليل التنمية البشرية في هذا الشكل هي من تقرير الأمم المتحدة للتنمية البشرية لعام 2001 [برنامج الأمم المتحدة الإنمائي، 2001]، وبيانات نصيب الفرد من الاستهلاك السنوي للطاقة هي بيانات عام 1999 من تقرير إدارة معلومات الطاقة [إدارة معلومات الطاقة، الجدول E.1، 2002]. ويبيّن الشكل أن نوعية الحياة تزداد مع زيادة استهلاك الفرد من الطاقة. وكما في الشكل (1.1)، فإن الزيادة ليست خطية؛ ويبدأ التحسن في نوعية الحياة بالاستقرار عندما يرتفع استهلاك الفرد من الطاقة إلى نحو 200,000 MJ.



الشكل (2.1): التنمية البشرية والاستهلاك السنوي للطاقة

من الجدير ملاحظة أن قيم دليل التنمية البشرية لبعض البلدان منخفضة نسبياً، في حدود 80 في المئة، على الرغم من الارتفاع

النسبي لنصيب الفرد من استهلاك الكهرباء والطاقة. هذه البلدان تشمل الكويت (13082 kWh، HDI = 0.818)، وقطر (11851 kWh، HDI = 0.801)، والإمارات العربية المتحدة (11039 kWh، HDI = 0.809). عدد السكان في جميع هذه البلدان منخفض نسبياً (أقل من 3 ملايين نسمة لكل منها في عام 1999). وبالإضافة إلى مواطنيها، فإن مجموع السكان في هذه البلدان يتضمن نسبيّاً طبقات كبيرة فقيرة وخادمة. والبلدان التي تمتلك قِيم كبرى لدليل التنمية البشرية، متجاوزة 90 في المئة، هي الدول ذات الاقتصادات الناضجة نسبياً، مثل دول أوروبا الغربية، وكندا، وأستراليا، والمملكة المتحدة، واليابان، والولايات المتحدة. هذه البلدان تميل إلى الامتلاك العالي نسبياً من الطبقات المتوسطة. والبلدان الثلاثة ذات النصيب الأكبر للفرد من استهلاك الكهرباء في الشكل (1.1) هي النرويج (24773 kWh، HDI = 0.939)، وأيسلندا (23486 kWh، HDI = 0.932)، وكندا (16315 kWh، HDI = 0.936). ونصيب الفرد من استهلاك الكهرباء في الولايات المتحدة (HDI = 0.934) كان 12838 kWh في عام 1999.

يمكن أيضاً استخدام البيانات المستخدمة في إعداد الشكلين (1.1) و(2.1) يمكن أيضاً استخدامها لعمل توقُّع سريع للطلب على الطاقة. لنفترض بأن عدد سكان العالم سيستقر عند حوالي 8 بلايين نسمة في القرن الحادي والعشرين وأن جميع السكان سيحتاجون إلى نوعية حياة متمثلة بدليل تنمية بشرية قيمته 0.9 (وهو تقريباً قيمة دليل التنمية البشرية التي حققته إيطاليا، وإسبانيا، و(إسرائيل)). في هذه الحالة، فإن نصيب الفرد من الطلب على الطاقة من الشكل (2.1) هو تقريباً 200,000 MJ للشخص الواحد، أو $1500 \text{ quad} \approx 1.6\times10^{15}$ MJ. عدد سكان العالم البالغ تقريباً 6 بلايين نسمة استهلك ما يناهز 387 quad من الطاقة في عام 1999. ووفقاً لهذا التصور، سيكون الطلب على الطاقة في جميع أنحاء العالم تقريباً أربعة أضعاف مستوى استهلاك

الطاقة في عام 1999 بحلول نهاية القرن الحادي والعشرين. ونصيب الفرد من استهلاك الطاقة يجب أن يزداد من متوسط قدره 68,000 MJ للشخص الواحد في عام 1999 إلى القيمة 200,000 MJ المطلوبة للشخص الواحد في عام 2100. هذه العملية الحسابية توضح أنواع الفرضيات التي يجب القيام بها لإعداد توقعات الطلب للطاقة. على أقل تقدير، توقُّع الطلب للطاقة في نهاية القرن الحادي والعشرين يجب أن يقدِّم تقديراً لحجم السكان ونصيب الفرد من الطاقة في ذلك الوقت.

4.1 الطاقة الميكانيكية

توضِّح المناقشة السابقة في القسم 3.1 أن استهلاك الطاقة مساهِمٌ أساسي لنوعية الحياة. وسلوك أيّ نظام فيزيائي أو حيوي يعتمد على طاقة النظام. ويتم تعريف مفهوم الطاقة عادة بدلالة السلوك الديناميكي لجُسيم مادي بسيط. وقوانين نيوتن تصف السلوك الديناميكي لجُسيم كلاسيكي بدلالة القوى المؤثرة على الجُسيم. والأوصاف الأخرى لديناميكيات الجُسيم الكلاسيكي تعتمد على الطاقة أكثر من اعتمادها على القوة. وهناك صياغتان مماثلتان تقعان تحت علم الطاقة وسيتم استخدامهما في ما بعد لتساعدانا في فهم ظواهر مثل الاضمحلال النووي (Nuclear Decay) والفولتضوئية الشمسية (Solar Photovoltaics). وقبل أن نناقش الصياغات الديناميكية بدلالة الطاقة، نقدّم أولاً استعراضاً موجزاً للميكانيكا الكلاسيكية. وفي استعراضنا هذا نقوم بتقديم الرموز والتسميات المستخدمة في مواقع أخرى من هذا الكتاب.

الميكانيكا الكلاسيكية

لقد كانت الفيزياء الكلاسيكية من الناحية التاريخية العلم الطبيعي للحياة اليومية. فنظريات الفيزياء الكلاسيكية قابلة للتطبيق على نطاق

واسع نسبياً في الظواهر الطبيعية. وبعض الأمثلة على الأنظمة الفيزيائية التي تقع ضمن اختصاص الفيزياء الكلاسيكية تشمل الكواكب السيارة في مداراتها حول النجوم، وسيارات السباق التي تقطع مسارات مرصوفة، وتشغيل العديد من الأجهزة المنزلية العادية، وطيران كرة التنس في أثناء انتقالها من مضرب إلى آخر. هذه الأنظمة غالباً ما تعرف باسم «الأنظمة العيانية» (Macroscopic Systems) لأننا نستطيع أن نلاحظها بحواسنا غير المدعومة. أما الأنظمة ذات المقاييس الأصغر، مثل سلوك الإلكترونات في الذرات، فتسمى «الأنظمة المجهرية» (Microscopic Systems) ولا تخضع دائماً لـ «قوانين» الفيزياء الكلاسيكية. ويتم وصف الأنظمة المجهرية باستخدام فيزياء الكم التي سنقدّمها لاحقاً. والطاقة الكلاسيكية هي مفهوم للطاقة المحتواة ضمن الفيزياء الكلاسيكية.

نشر إسحق نيوتن أول تعبير موثوق للميكانيكا الكلاسيكية في عام 1687. واحتوت رسالته **المبادئ الرياضية للفلسفة الطبيعية** (*Mathematical Principles of Natural Philosophy*) نظرية قادرة على وصف حركة الأجسام العيانية. كانت نظريته مستندة إلى ثلاث فرضيات أساسية نَعرِفها اليوم بقوانين نيوتن للحركة. قبل مناقشة هذه الفرضيات، من المهم أن نفهم رؤية نيوتن للمكان والزمان.

إن الزمان والمكان، بالنسبة إلى نيوتن، لهما عدد من الصفات الهامة:

> **الصفة 1.1**: الزمان المطلق، والحقيقي، والرياضي، في حد ذاته، ومن طبيعته الخاصة، يتدفق برصانة من دون ارتباط بأيّ شيء خارجي. . . . المكان المطلق، في طبيعته الخاصة، ومن دون ارتباط بأيّ شيء خارجي، يبقى دائماً متشابهاً وثابتاً (Wolff, 1965, p.159).

ان الزمان والمكان مستقلان عن بعضهما البعض. ومثل الفيلسوف اليوناني أرسطو، اعتقد نيوتن أن أبعاد الزمان والمكان دائمة.

والاعتقاد بدوام الزمان والمكان يتضمن وجود نقطة في الفراغ ولحظات من الزمن مستقلين عن الأجسام أو المراقبين المحصورين ضمن نطاقات المكان والزمان. ووفقاً لنيوتن، فإن المراقب المتحرك بأيّ سرعة سوف يقيس مرور الزمن بنفس المعدل الذي يقيسه المراقب غير المتحرك. المدة الزمنية هي نفسها بغض النظر عن نقطة المراقبة لشخص يقيس الوقت المنقضي. علاوة على ذلك، إذا سجّل المراقب المتحرك حدثين يقعان آنياً في نفس إطار الإسناد الذي هو فيه، فإن المراقب غير المتحرك سيسجّل أيضاً الحدوث الآني للحدثين نفسهما.

إن مفهوم نيوتن للمكان والزمان مناسب للكثير من الأغراض العملية. إذا رأيت، مثلاً، غطائي المحرك والصندوق لسيارتك المتحركة يفتحان فجأة في وقت واحد، فإن الشخص الواقف بالجوار والمشاهِد للحدث سوف يرى أيضاً غطائي المحرك والصندوق يفتحان في وقت واحد. من ناحية أخرى، إذا كنا نتحرك بسرعة مقاربة لسرعة الضوء، فإن مفهوم نيوتن يصبح غير ملائم ويجب أن نستخدم نظرية النسبية لإينشتاين. سيتم مناقشة نسبية إينشتاين لاحقاً.

وباستعمال تصوره للمكان والزمان، صاغ نيوتن ثلاث فرضيات أو «قوانين» لوصف حركة الأجسام. ووفقاً لقانونه الأول، فإن الحركة المنتظمة غير المتسارعة لجسم ستستمر إلى ما لا نهاية ما لم تؤثر على الجسم قوة خارجية.

الصفة 2.1: القانون الأول: كل جسم يستمر على حالته من سكون أو حركة منتظمة في خط مستقيم، ما لم يُجبَر على تغيير تلك الحالة بواسطة قوى تؤثر عليه (Wolff, 1965, p.166).

وقانون نيوتن الثاني هو الأساس القائم على مفهومه «القوة تساوي الكتلة في العجلة»:

الصفة 3.1: القانون الثاني: يتناسب التغيُّر في الحركة مع القوة الفاعلة المؤثرة؛ ويكون في اتجاه الخط المستقيم الذي تؤثر فيه القوة (Wolff, 1965, p.166).

إن القانون الأول هو حالة خاصة من القانون الثاني. وكمية الحركة المشار إليها في نص قانونَي نيوتن الأول والثاني هي حاصل ضرب كتلة الجسم في سرعته. وحاصل الضرب هذا ـ الكتلة في السرعة ـ يسمّى اليوم بكمية التحرك (أو الزخم) (Momentum). ويشير القانون الثاني إلى أن التغيُّر في كمية التحرك لجسم خلال فترة زمنية معيّنة يعتمد على القوى المؤثرة على الجسم.

ويصف قانون نيوتن الثالث التفاعل بين الأجسام:

الصفة 4.1: القانون الثالث: لكل فعل هناك دائماً رد فعل مضاد ومساو؛ أو، الأفعال المتبادلة لجسمين على بعضهما الآخر تكون دائماً متساوية ومتضادة في الاتجاه (Wolff, 1965, p.167).

وقوانين نيوتن الثلاثة وتصوراته للمكان والزمان هي العناصر الأساسية للنظرية المعروفة باسم الميكانيكا الكلاسيكية اللانسبية.

كتب نيوتن قانون القوة للميكانيكا الكلاسيكية على الصورة التالية:

$$\vec{F} = \dot{\vec{p}} = \frac{d\vec{p}}{dt} \qquad (1.4.1)^{(*)}$$

حيث $\vec{F}$ القوة المؤثرة على الجسم، و$\vec{P}$ كمية تحركه، وt زمن

(*) تجدر الملاحظة إلى أن كل المعادلات تقرأ من اليسار إلى اليمين وفقاً لكتابة المعادلة باللغة الأجنبية (المنظمة).

مطلق. النقطة الموجودة على متجه كمية التحرك تدل على التفاضل بالنسبة إلى الزمن t. ولجسم كتلته m وسرعته $\vec{v}$ لدينا:

$$\vec{p} = m\vec{v} \tag{1.4.2}$$

فإذا كانت الكتلة ثابتة بالنسبة إلى الزمن، تصبح المعادلة (1.4.1) كالآتي:

$$\vec{F} = \frac{dm\vec{v}}{dt} = m\frac{d\vec{v}}{dt} = m\vec{a} \tag{1.4.3}$$

حيث تعطى عجلة (تسارع) الجسم $\vec{a}$ بالعلاقة:

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} \tag{1.4.4}$$

يمكن كتابة متجه الموضع في نظام الإحداثيات الديكارتية (Cartesian coordinates) على الصورة $r = \{x,y,z\}$ والسرعة والعجلة يمكن كتابتهما على الصورة:

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}, \quad \vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2} \tag{1.4.5}$$

وتصبح المعادلة (1.4.3) كالتالي:

$$\vec{F} = m\frac{d^2\vec{r}}{dt^2} \tag{1.4.6}$$

المعادلة (1.4.6) هي التعبير المتجهي للمعادلات التفاضلية الثلاث الآتية:

$$F_x = m\frac{d^2x}{dt^2}, \; F_y = m\frac{d^2y}{dt^2}, \; F_z = m\frac{d^2z}{dt^2} \tag{1.4.7}$$

مثال 1.4.1: الجسيمات الحرة

افترض جسيماً كتلته m، ثابتة ويتحرك حرّاً، أي إن الجسيم غير خاضع لأيّ قوى خارجية. في هذه الحالة، $\vec{F} = 0$ والمعادلة (1.4.1) تقول إن:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = 0 \tag{1.4.8}$$

تتحقق المعادلة (1.4.8) عندما تكون كمية التحرك ثابتة، أي إن:

$$\vec{p} = m\vec{v} = \text{ثابت} = \vec{p}_{\text{f}} \qquad (1.4.9)$$

حيث $\vec{p}_{\text{f}}$ هي كمية التحرك الثابتة للجسيم الحر. وحيث إن الكتلة ثابتة، نحصل على السرعة الثابتة:

$$\vec{v}_{\text{f}} = \frac{\vec{p}_{\text{f}}}{m} \qquad (1.4.10)$$

الموضع $\vec{r}_{\text{f}}$ للجسيم الحر يمكن إيجاده من المعادلة:

$$\frac{d\vec{r}_{\text{f}}}{dt} = \vec{v}_{\text{f}} = \frac{\vec{p}_{\text{f}}}{m} \qquad (1.4.11)$$

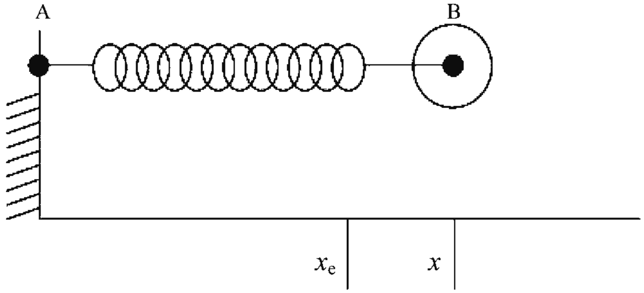
وحل المعادلة (1.4.11) هو:

$$\vec{r}_{\text{f}} = \vec{v}_{\text{f}}\, t + \vec{r}_0 \qquad (1.4.12)$$

حيث $\vec{r}_{\text{f}}$ الموضع الابتدائي للجسيم، أي الموضع عند الزمن $t = 0$. نلاحظ من المعادلة (1.4.12) أن الجسيم الحر سيتحرك في خط مستقيم. ولتغيير المسار الخطي للجسيم يتطلب قوة خارجية.

مثال 2.4.1: المذبذِبات التوافقية

يبيّن الشكل 3.1 زنبركاً كتلته مهملة وأحد طرفيه متصلاً بِكُرة كتلتها m عند النقطة B والطرف الآخر له مثبت عند النقطة A. تتذبذب الكرة حول نقطة اتزان x_e على طول المحور x.



الشكل (3.1): المذبذِب التوافقي

سنرمز للإزاحة بالرمز q حيث $q = x - x_e$. القوة f المؤثرة على الكرة على طول المحور x تخضع لقانون هوك (Hooke's Law) الآتي:

$$f = -kq \qquad (1.4.13)$$

حيث الثابت k هو ثابت هوك. وبدلالة الإحداثيات، تصبح معادلة القوة كالتالي:

$$f = m\ddot{x} = m\ddot{q} = -kp \qquad (1.4.14)$$

لأن:

$$\ddot{q} = \frac{d^2q}{dt^2} = \frac{d^2(x-x_e)}{dt^2} = \frac{d^2x}{dt^2} = \ddot{x} \qquad (1.4.15)$$

بإعادة ترتيب المعادلة (1.4.14) نحصل على:

$$\ddot{q} = \frac{k}{m}q \qquad (1.4.16)$$

إذا عرّفنا التردد الزاوي للذبذبة ω على الصورة:

$$\omega^2 = \frac{k}{m} \qquad (1.4.17)$$

فإننا نستطيع كتابة المعادلة (1.4.16) على الصورة التالية:

$$\ddot{q} = -\omega^2 q \qquad (1.4.18)$$

وحل هذه المعادلة (1.4.18) هو:

$$q = q_{\max}\cos\omega t \qquad (1.4.19)$$

حيث الثابت q_{max} أقصى إزاحة من نقطة الاتزان x_e. التردد الزاوي ω مقاساً بالراديان لكل ثانية (radians/s) يرتبط بالتردد مقاساً بالهيرتز (Hertz) (دورة لكل ثانية) بالعلاقة.

مثال 3.4.1: جاذبية نيوتن

مقدار قوة الجاذبية على الجسم A ذي الكتلة m_A الذي يبعد مسافة r عن الجسم B ذي الكتلة m_B هو:

$$F_G = m_A \ddot{r} = -G\frac{m_A m_B}{r^2} \qquad (1.4.20)$$

حيث G ثابت الجاذبية. القوة هي قوة تجاذب على طول الخط الذي يصل مركز ثقل كل جسم. ومعادلة الحركة هي:

$$m_A \ddot{r} = -\frac{G m_A m_B}{r^2} \qquad (1.4.21)$$

والعجلة نصف القطرية (Radial Acceleration) يمكن كتابتها على الصورة:

$$\ddot{r} = \frac{d^2 r}{dt^2} = \frac{d\dot{r}}{dt} = \frac{dr}{dt}\frac{d\dot{r}}{dr} = \dot{r}\frac{d\dot{r}}{dr} \qquad (1.4.22)$$

بتعويض المعادلة (1.4.22) في المعادلة (1.4.21) نحصل على:

$$m_A \dot{r}\frac{d\dot{r}}{dr} = -\frac{G m_A m_B}{r^2} \qquad (1.4.23)$$

وتكامل المعادلة (1.4.23) هو:

$$m_A \int \dot{r}\, d\dot{r} = -G m_A m_B \int \frac{dr}{r^2} \qquad (1.4.24)$$

أو:

$$\frac{1}{2} m_A \dot{r}^2 - \frac{G m_A m_B}{r} = E \qquad (1.4.25)$$

ثابت التكامل E هو مجموع طاقة الحركة وطاقة الوضع. ويمكن توضيح هذا من معرفتنا بأن $\dot{r}$ هي السرعة نصف القطرية v_r. وبذلك، يمكن كتابة المعادلة (1.4.25) على الصورة:

$$E_K + V_G = E \qquad (1.4.26)$$

حيث E_K طاقة حركة الجسم A وتعطى بالعلاقة:

$$E_K = \frac{1}{2} m_A v_r^2 \qquad (1.4.27)$$

و V_G طاقة الوضع لمجال الجاذبية المؤثر في الجسم A وتعطى بالعلاقة:

$$V_G = -\frac{G m_A m_B}{r} \qquad (1.4.28)$$

قوة الجاذبية على الجسم A عند سطح الأرض هي:

$$-\frac{GMm_A}{R^2} = -m_A g \qquad (1.4.29)$$

حيث M كتلة الأرض، وR نصف قطر الأرض، وg عجلة الجاذبية على سطح الأرض. بتبسيط المعادلة (1.4.29) نحصل على:

$$g = \frac{GM}{R^2} \qquad (1.4.30)$$

قوى الطبيعة

تُجسِّد الفيزياء الكلاسيكية رؤية حتمية للطبيعة. فإذا استطعنا قياس الحركة الابتدائية (أو كمية التحرك) والموضع الابتدائي لجسم في اللحظة نفسها، كما تسمح به نظرية نيوتن، نستطيع عندئذ، من حيث المبدأ، أن نحسب بدقة السلوك الماضي والمستقبلي للجسم، شرط أن نعرف جميع القوى التي تؤثر في الجسم خلال الفترة الزمنية المعنية بالنسبة إلينا. المعادلات الرياضية التي تصف سلوك الجسم محدَّدة تماماً، على الرغم من أنها قد لا تكون قابلة للحل، إذا كنا نعرف القوى المؤثرة. ما هي القوى الأساسية للطبيعة؟

حتى القرن العشرين كانت هناك فقط قوتان أساسيتان معروفتان: قوة الجاذبية والقوة الكهرومغناطيسية. هاتان القوتان هما المرتكز الأساسي للفيزياء الكلاسيكية. قوة الجاذبية تتحكم في حركة الأجرام السماوية. وكل جسم كتلي يتأثر بجذب الجاذبية له.

إن الكهرباء والضوء هما مثالان على الكهرومغناطيسية. والكهرومغناطيسية مقترِنة بالأجسام التي لها شحنة كهربائية، مثل الإلكترونات. القوة الكهرومغناطيسية هي القوة التي تربط الإلكترونات بالنوى الذرية، وهي واحدة من أربع قوى أساسية. وبالإضافة إلى قوة الجاذبية والقوة الكهرومغناطيسية، القوتان الأخريتان هما القوة الضعيفة والقوة القوية. القوة الضعيفة مقترِنة باضمحلال الجسيمات الأولية، والقوة القوية تحافظ على تماسك نوى الذرّات مع بعضها. ومن الممكن نظرياً دمج القوة الكهرومغناطيسية والقوة الضعيفة لتعريف قوة جديدة تسمى القوة الكهروضعيفة (electroweak). ومن وجهة النظر هذه، ستُختزَل القوى الأساسية الأربع إلى ثلاث: الجاذبية، والقوة الكهروضعيفة، والقوة القوية.

في وقتنا الحاضر، غالباً ما يتحدث الفيزيائيون عن التفاعلات بدلاً من القوى. فالمصطلح «تفاعل» ناجم عن المفهوم النظري بأن ما ندرك أنه قوة بين جسمين هو في الواقع تبادل جُسيمات. على سبيل المثال، يُعتقَد بأن الأرض والقمر يتبادلان جُسيمات تسمّى غرافيتونات (Gravitons). والنتيجة الطبيعية لتبادل الغرافيتونات هو التجاذب بين الأرض والقمر.

5.1 الديناميكا وتحَوّلات الطاقة

إحدى الخصائص الهامة للطاقة هي أنها يمكن أن تتحول من صورة إلى أخرى. سنبدأ مناقشتنا لتحوّل الطاقة بتقديم صياغتين للديناميكا التي تعتمد على الطاقة: معادلات لاغرانج (Lagrange) ومعادلات هاميلتون (Hamilton). بعد ذلك نقوم بدراسة تبادل الطاقة بين طاقة حركة وطاقة وضع لمذبذِب توافقي كمثال توضيحي على تحوّل الطاقة.

معادلات لاغرانج

صاغ عالم الرياضيات الفرنسي جوزيف لويس لاغرانج (Joseph Louis Lagrange) القوانين الديناميكية للحركة بدلالة دالة الطاقة. وصياغة لاغرانج تعميم لقانون نيوتن الثاني للحركة الذي يمكن كتابته على الصورة:

$$F_i = \frac{d}{dt} m\dot{x}_i, \quad i = 1,2,3 \tag{1.5.1}$$

يستخدم الرمز السفلي i للدلالة على المُركَّبات المتعامدة للمتجه. على سبيل المثال، مُركَّبات متجه الموضع في الإحداثيات الديكارتية (الكارتيزية) هي:

$$x_1 = x, x_2 = y, x_3 = z \tag{1.5.2}$$

ومُركَّبات القوة هي:

$$F_1 = F_x, F_2 = F_y, F_3 = F_z \tag{1.5.3}$$

قام لاغرانج بتعريف دالة L تعتمد على إحداثيات الموضع q والسرعة $\dot{q}$ وتسمى الدالة L بدالة لاغرانج وتأخذ الشكل التالي:

$$L = L(\vec{q}, \dot{\vec{q}}) = T - V \tag{1.5.4}$$

حيث T طاقة الحركة وV طاقة الوضع. طاقة الحركة T قد تعتمد على الموضع والسرعة، أي $T(\vec{q}, \dot{\vec{q}})$ وطاقة الوضع V قد تعتمد على الموضع فقط لقوة محافظة. والقوة المحافظة هي القوة $\vec{F}$ التي يمكن اشتقاقها من طاقة الوضع V بالعلاقة:

$$F_i = -\frac{\partial V}{\partial q_i}, \quad i = 1,2,3 \tag{1.5.5}$$

أو يمكن كتابتها بالصيغة المتجهية كما يلي:

$$\vec{F} = -\nabla V \tag{1.5.6}$$

حيث ▽V مَمال طاقة الوضع. ويتم حساب كمية التحرك من دالة لاغرانج على النحو التالي:

$$p_i = \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}, \quad i = 1,2,3 \qquad (1.5.7)$$

والقوة هي:

$$F_i = \frac{\partial L}{\partial q_i}, \quad i = 1,2,3 \qquad (1.5.8)$$

ودالة لاغرانج هي الدالة التي تحقق معادلات لاغرانج التالية:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0, \quad i = 1,2,3 \qquad (1.5.9)$$

تكافئ معادلات لاغرانج معادلات نيوتن لطاقة الوضع المحافظة، أيْ طاقة الوضع التي تعتمد على الموضع فقط. وباستخدام المعادلتين (1.5.7) و(1.5.8) في المعادلة (1.5.9) نحصل على قانون نيوتن الثاني على الصورة:

$$\dot{p}_i - F_i = 0, \quad i = 1,2,3 \qquad (1.5.10)$$

وتحتفظ معادلات لاغرانج بالصورة المبيّنة في المعادلة (1.5.9) لأيّ تحويل اختياري للإحداثيات.

يمكن استنتاج معادلات لاغرانج من القاعدة التغيّرية (Variational Principle) أو قاعدة الفعل الأقل (Principle of Least Action) التي وضعها عالم الرياضيات الإسكتلندي وليام هاميلتون (William R. Hamilton) في عام 1834. وتنص قاعدة هاميلتون التغيّرية على أن الجسيم الكلاسيكي يتبع مساراً يجعل تكامل الفعل التالي:

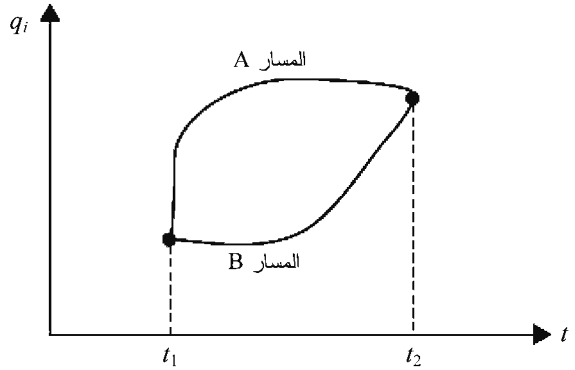
$$S = \int_{t_1}^{t_2} L(q_i, \dot{q}_i, t)\,dt, \quad i = 1,2,3 \qquad (1.5.11)$$

هو الأقصى بين الزمنين t_1 وt_2. يوضح الشكل (4.1) مسارين

محتملين للنظام. ويمكن كتابة القاعدة التغيّرية رياضياً على النحو التالي:

$$\delta S = \delta \int_{t_1}^{t_2} L\,dt = 0 \tag{1.5.12}$$

حيث δ تدل على التغيّر. الفعل في المعادلة (1.5.11) مهم في الفيزياء الكلاسيكية ويؤدي أيضاً دوراً هامًّا في فيزياء الكم، كما سنناقش في القسم 5.8.



الشكل (4.1): مسارا النظام الكلاسيكي

مثال 1.5.1: معادلات لاغرانج لجسيم حر

دالة لاغرانج لجسيم حر يتحرك في بُعد فراغي واحد هي:

$$L_f = \frac{1}{2} m\dot{q}_f^2 \tag{1.5.13}$$

لأن:

$$T_f = \frac{1}{2} m\dot{q}_f^2, \quad V_f = 0 \tag{1.5.14}$$

القوة المؤثرة على الجسيم هي:

$$F_f = \frac{\partial L_f}{\partial q_f} = 0 \tag{1.5.15}$$

وكمية تحرك الجسيم هي:

$$p_f = \frac{\partial L_f}{\partial \dot{q}_f} = m\dot{q}_f \qquad (1.5.16)$$

لأن L_f لا تعتمد بشكل صريح على q_f. ومن معادلات لاغرانج نحصل على:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L_f}{\partial \dot{q}_f}\right) - \frac{\partial L_f}{\partial q_f} = \frac{d}{dt} m\dot{q}_f = \frac{d}{dt} p_f = \dot{p}_f = 0 \qquad (1.5.17)$$

مثال 2.5.1: معادلات لاغرانج لمذبذِب توافقي

طاقة الحركة T_{HO} وطاقة الوضع V_{HO} لمذبذِب توافقي في بُعد فراغي واحد هما:

$$T_{HO} = \frac{1}{2} m\dot{q}_{HO}^2, \quad V_{HO} = \frac{1}{2} kq_{HO}^2 \qquad (1.5.18)$$

حيث m كتلة الجسم المتذبذب وk ثابت الزنبرك. دالة لاغرانج المناظرة للمذبذب التوافقي هي:

$$L_{HO} = T_{HO} - V_{HO} = \frac{1}{2} m\dot{q}_{HO}^2 - \frac{1}{2} kq_{HO}^2 \qquad (1.5.19)$$

والقوة على الجسم المتذبذب هي:

$$F_{HO} = \frac{\partial L_{HO}}{\partial q_{HO}} = -kq_{HO} \qquad (1.5.20)$$

وكمية تحرك الجسم هي:

$$p_{HO} = \frac{\partial L_{HO}}{\partial \dot{q}_{HO}} = -m\dot{q}_{HO} \qquad (1.5.21)$$

ومن معادلات لاغرانج نحصل على:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L_{HO}}{\partial \dot{q}_{HO}}\right) - \frac{\partial L_{HO}}{\partial q_{HO}} = \frac{d}{dt} m\dot{q}_{HO} - (-kq_{HO}) = m\ddot{q}_{HO} + kq_{HO} = 0 \qquad (1.5.22)$$

والتي تعطينا معادلة القوة المتوقعة الآتية:

$$m\ddot{q}_{HO} = -kq_{HO} \qquad (1.5.23)$$

معادلات هاميلتون

إن معادلات لاغرانج ومعادلات نيوتن هي معادلات تفاضلية من الدرجة الثانية في الزمن ـ أي إن هذه المعادلات تعتمد على المؤثر التفاضلي d^2/dt^2. معادلات هاميلتون تعبّر عن قوانين الديناميكا الكلاسيكية كمعادلات تفاضلية من الدرجة الأولى في الزمن ـ أي إن معادلات هاميلتون تعتمد على المؤثر التفاضلي d/dt. وللحصول على معادلات هاميلتون، نُعرّف دالة هاميلتون H التي تعتمد على كمية التحرك $\vec{p}$ والموضع $\vec{q}$، أي إن:

$$H = H(p_i, q_i) = \sum_{i=1}^{3} p_i \dot{q}_i - L(q_i, \dot{q}_i) \qquad (1.5.24)$$

وبالتالي فإن معادلات هاميلتون هي:

$$\frac{\partial H}{\partial p_i} = \dot{q}_i \qquad (1.5.25)$$

و:

$$\frac{\partial H}{\partial q_i} = -\dot{p}_i \qquad (1.5.26)$$

بالنسبة لطاقة الوضع المحافظة، فإن دالة هاميلتون H تساوي الطاقة الكليّة، أي إن:

$$H = T + V \qquad (1.5.27)$$

حيث $T = T(\vec{p}, \vec{q})$ و $V = V(\vec{q})$

مثال 3.5.1: معادلات هاميلتون لجسيم حر

إن طاقة الحركة وطاقة الوضع لجُسيم حر كتلته m يتحرك في بُعد فراغي واحد هما:

$$T_f = \frac{p_f^2}{2m}, \quad V_f = 0 \qquad (1.5.28)$$

ودالة هاميلتون هي:

$$H_{\mathrm{f}} = T_{\mathrm{f}} + V_{\mathrm{f}} = \frac{p_{\mathrm{f}}^2}{2m} \qquad (1.5.29)$$

ومن معادلات هاميلتون، نحصل على السرعة:

$$\frac{\partial H_{\mathrm{f}}}{\partial p_{\mathrm{f}}} = \frac{p_{\mathrm{f}}}{m} = \dot{q}_{\mathrm{f}} \qquad (1.5.30)$$

وعلى القوة:

$$\frac{\partial H_{\mathrm{f}}}{\partial q_{\mathrm{f}}} = 0 = -\dot{p}_{\mathrm{f}} \quad \text{أو} \quad \dot{p}_f = 0 \qquad (1.5.31)$$

تبيّن معادلة القوة، أيْ المعادلة (1.5.31)، أن كمية التحرك للجسيم الحر ثابتة.

مثال 4.5.1: معادلات هاميلتون لمذبذِب توافقي

إن طاقة الحركة لجسم كتلته m يتذبذب في بُعد فراغي واحد هي:

$$T_{\mathrm{HO}} = \frac{p_{\mathrm{HO}}^2}{2m} \qquad (1.5.32)$$

وطاقة الوضع هي:

$$V_{\mathrm{HO}} = \frac{1}{2} k q_{\mathrm{HO}}^2 \qquad (1.5.33)$$

حيث k ثابت الزنبرك. ودالة هاميلتون هي:

$$H_{\mathrm{HO}} = T_{\mathrm{HO}} + V_{\mathrm{HO}} = \frac{p_{\mathrm{HO}}^2}{2m} + \frac{1}{2} k q_{\mathrm{HO}}^2 \qquad (1.5.34)$$

ومن معادلات هاميلتون، نحصل على السرعة:

$$\frac{\partial H_{\mathrm{HO}}}{\partial p_{\mathrm{HO}}} = \frac{p_{\mathrm{HO}}}{m} = \dot{q}_{\mathrm{HO}} \qquad (1.5.35)$$

وعلى القوة:

$$\frac{\partial H_{\mathrm{HO}}}{\partial q_{\mathrm{HO}}} = k q_{\mathrm{HO}} = -\dot{p}_{\mathrm{HO}} \quad \text{or} \quad \dot{p}_{\mathrm{HO}} = -k q_{\mathrm{HO}} \qquad (1.5.36)$$

وبدمج المعادلتين (1.5.35) و(1.5.36) نحصل على:

$$\ddot{q}_{\text{HO}} = -\frac{k}{m} q_{\text{HO}} = -\omega^2 q_{\text{HO}} \tag{1.5.37}$$

حيث تردد الذبذبة هو:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \tag{1.5.38}$$

تحوّل الطاقة في المذبذِب التوافقي

تعطينا دالة هاميلتون في المعادلة (1.5.34) الطاقة الكلية لمذبذِب توافقي. وإزاحة المذبذب التوافقي من نقطة الاتزان معطاة بالمعادلتين (1.4.17) و(1.4.19):

$$q_{\text{HO}} = q_{\max}\cos(\omega t), \quad \omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \tag{1.5.39}$$

ومعدل التغيّر في الإزاحة بالنسبة إلى الزمن هو:

$$\dot{q}_{\text{HO}} = -\omega q_{\max}\sin(\omega t) \tag{1.5.40}$$

يمكن التعبير عن طاقة الحركة للمذبذب التوافقي كدالة في الزمن بتعويض المعادلتين (1.5.40) و (1.5.35) في المعادلة (1.5.32). والنتيجة هي:

$$T_{\text{HO}} = \frac{p_{\text{HO}}^2}{2m} = \frac{m}{2}\dot{q}_{\text{HO}}^2 = \frac{m}{2}\omega^2 q_{\max}^2 \sin^2\omega t = \frac{k}{2} q_{\max}^2 \sin^2\omega t \tag{1.5.41}$$

وبنفس الخطوات السابقة وباستخدام المعادلتين (1.5.39) و(1.5.33)، نحصل على طاقة الوضع للمذبذب التوافقي على الصورة التالية:

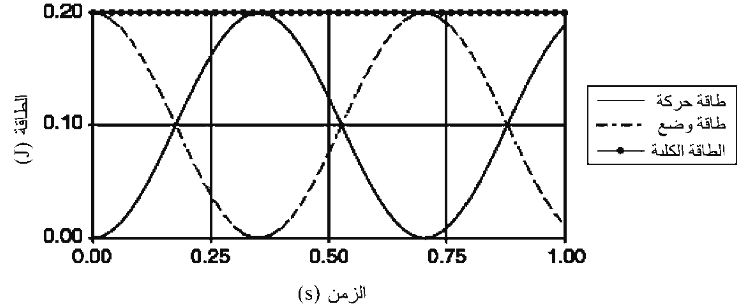
$$V_{\text{HO}} = \frac{1}{2} k q_{\text{HO}}^2 = \frac{k}{2} q_{\max}^2 \cos^2\omega t \tag{1.5.42}$$

ونحصل على الطاقة الكلية للمذبذب التوافقي بجمع المعادلتين

(1.5.3) و(1.5.42) كما في المعادلة (1.5.43). تكون دالة هاميلتون الناتجة كالتالي:

$$H_{\mathrm{HO}} = T_{\mathrm{HO}} + V_{\mathrm{HO}} = \frac{k}{2}q_{\max}^2 \sin^2 \omega t + \frac{k}{2}q_{\max}^2 \cos^2 \omega t = \frac{k}{2}q_{\max}^2 \quad (1.5.43)$$

نلاحظ من المعادلة (1.5.43) أن الطاقة الكليّة للمذبذب التوافقي ثابتة بالنسبة إلى الزمن، على الرغم من أن طاقتي الحركة والوضع يعتمدان على الزمن. يبيّن الشكل (5.1) العلاقة بين طاقة الحركة، وطاقة الوضع، والطاقة الكلية لمذبذب توافقي كتلته 2 kg، وثابت الزنبرك له 40 N/m، وأقصى إزاحة له هي 0.1 m. تتحول طاقة الحركة وطاقة الوضع كل منهما إلى الأخرى بحيث تبقى الطاقة الكلية ثابتة. وهذا يعني أن الطاقة الكلية محفوظة.



الشكل (5.1): طاقات المذبذِب التوافقي

6.1 المتخصّصون في الطاقة

إن الطالب المتخرج اليوم يستطيع أن يتوقع وظيفة تدوم حتى عام 2040 أو ما بعد. فالطلب من قِبَل المجتمع على وقود البترول سيستمر عند أو أعلى من المستويات الحالية لعدة سنين، لكن التوجه يبدو واضحاً. والتشكيلة العالمية للطاقة تمر بمرحلة انتقال من تشكيلة سائدة للطاقة متمثلة بالوقود الأحفوري إلى تشكيلة طاقة تشمل مدى واسعاً من أنواع الوقود.

إن التوجهات المتزايدة في عدد السكان، والاستهلاك، وتذبذب الأسعار، وعدم استقرار العرض، والمخاوف البيئية هي تغيّرات حافزة إلى مزيج الطاقة واستراتيجيات الطاقة في القرن الحادي والعشرين. وفي محاولة للرد على واقع السوق، تبدأ بعض شركات النفط والغاز وشركات الطاقة الكهربائية بتحويل نفسها إلى شركات طاقة، وهذا الاتجاه من المتوقع أن يستمر[2]. هذه الشركات رائدة في مجال صناعة الطاقة الناشئة. وستحتاج إلى نوع جديد من المتخصصين لمساعدتها للعمل على مستويات مُثلى.

يُعرِّف ثومان وميهتا (Thumann and Mehta, 1997) هندسة الطاقة بالتخصّص الذي «يطبِّق المعرفة العلمية من أجل تحسين الاستخدام الشامل للطاقة» (ص 1). المتخصصون في شركات الطاقة سيتوجب عليهم فهم دور مكوّنات الطاقة البديلة في مزيج الطاقة. وسيحتاجون إلى فهم كيفية تحويل الطاقة من شكل إلى شكل آخر للطاقة، ونتائج تحويلاتها. وإبداع المتخصّصين المستقبليين في الطاقة وقدرتهم على المساهمة في تكوين السياسة العامة سيتعاظم إذا ما تمكنوا من تحديد وحل المشاكل المتعلقة بالاقتناء والاستخدام المقبول بيئياً للعديد من مكوّنات الطاقة.

إن التحسينات في التكنولوجيا والاعتماد المتزايد على المعلومات ستتطلب مستوى عالياً من الخبرة التقنية لاكتساب الموارد نيابة عن المجتمع. لتلبية المطالب التقنية، توقَّع واليش (Walesh, 1995) أن مهندسي المستقبل سيحتاجون إلى فترات مخصّصة للتعلُّم أو لإعادة التدرُّب بين فترات الوظيفة الدائمة طوال حياتهم الوظيفية. كتب ماكدونالد (MacDonald, 1999) في **سلسلة المهنة ـ الإدارة** (*Career-Management Series*) التابعة لجمعية مهندسي البترول (SPE) أن الناس يغيّرون وظائفهم كل خمس سنوات في المتوسط، وأنهم

نادراً ما يغيّرون مهنتهم في هذه العملية. وإحدى وسائل مساعدة المتخصّصين في الطاقة للاستعداد على تغيير وظائفهم ومهنهم هي تحديد متطلبات المهنة المستجدّة وتوفير الفرص التعليمية المناسبة.

وأحد أهداف المقرر التمهيدي للطاقة هو مساعدتك على فهم وتقدير دور مكوِّنات الطاقة البديلة في مزيج الطاقة. ولتحقيق هذا الهدف، من الضروري مناقشة منشأ مصادر الطاقة وتكنولوجيا الطاقة. وبتطوير القدرة على فهم منشأ مصادر الطاقة، نستطيع أن نقيّم بشكل أفضل جدوى تقنيات الطاقة المستجدة والدور الذي ستؤديه في المستقبل. هذه الخلفية الواسعة ستمنحك مرونة إضافية خلال حياتك الوظيفية وستساعدك على النجاح في مجال صناعة الطاقة التي تتطور من صناعة يسودها الوقود الأحفوري إلى صناعة تعمل بالعديد من مصادر الطاقة.

تعليقات ختامية

1- يوجد كم هائل من المؤلفات العلمية التي تناقش الطريقة التي يمارَس بها العلم. بعض المراجع التي وجدت أنها أكثر فائدة تشمل (Kuhn, 1970)، و(Gjwetsen, 1984)، و(Traweek, 1988)، و(Root-Bernstein, 1989)، و(Wolpert, 1992)، و(Friedlander, 1995)، و(Park, 2000).

2- للمزيد من المعلومات، انظر **مزيج الطاقة** («*Energy Mix*» Scenario C) في (Schollnberger, 1999)، ومقالة روكفيللر وباتريك (Rockefeller and Patrick, 1999)، ومناقشة (Hamto, 2000) عن تقنية خلية الوقود.

تمارين

1.1 أ) افترض أن شخصاً ما يستطيع العمل بمعدل 100 W. كم عدد الساعات التي يجب على هذا الشخص أن يعملها لإنجاز واحد كيلووات ـ ساعة (1 kWh) من الشغل؟

ب) ما هي القدرة الحصانية ((Horsepower (HP)) لهذا الشخص؟

2.1 أ) السُعر الغذائي هو واحد كيلو سُعر حراري من الطاقة (1 calorie = 1000 calories)، حيث السُعر الحراري هو وحدة قياس الطاقة الحرارية. والسُعر الديناميكي الحراري (Thermodynamic Calorie) يساوي 4.184 J. افترض شخصاً يستهلك 2000 Calorie في اليوم الواحد. عبّر عن هذا الاستهلاك بالوات؟

3.1 أ) احسب مقدار الطاقة المستخدَمة بواسطة مجفف شعر قدرته 1200 W تم تشغيله لمدة 15 دقيقة.

ب) ما المُدّة التي يجب فيها تشغيل مصباح قدرته 100 W ليستخدم مقدار الطاقة التي حصلت عليها في (أ)؟ عبّر عن إجابتك بالساعات.

ج) افترض أن المصباح استُخدِم فقط خلال مدة تشغيل مجفف الشعر المذكور في (أ). ما مقدار الطاقة المستخدمة بواسطة المصباح ومجفف الشعر؟ عبّر عن إجابتك بالجول والكيلووات ـ ساعة (kWh).

د) ما النسبة المئوية من الطاقة الكلية التي سيتم استخدامها بواسطة المصباح المذكور في (ج)؟

4.1 الشغل المبذول بواسطة محرّك حراري هو كمية الحرارة

المتولدة بواسطة المحرّك مضروبة في كفاءته الديناميكية الحرارية. أكمل الجدول التالي.

الزمن	المحرك	كمية الحرارة (J)	الكفاءة الديناميكية الحرارية (في المئة)	الشغل (J)
منتصف 1700	نيوكومن (Newcomen) بخاري	10,000	0.05	
أوائل 1800	الذراع المترجِّحة (Walking-beam)	10,000	4.0	
منتصف 1800	كورليس (Corliss) بخاري	10,000	20.0	

5.1 أ) افترض سيارة تسير باستهلاك قدرة حرارية 100,000 W. عبّر عن استهلاك القدرة الحرارية بالقدرة الحصانية.

ب) إذا تطلب منك 30 دقيقة للذهاب إلى العمل مستخدماً السيارة المذكورة في (أ)، احسب مقدار الطاقة المستخدَمة بوحدات kWh.

6.1 أ) دولة عدد سكانها 100 مليون نسمة تستهلك سنوياً طاقة مقدارها 30 quad. احسب نصيب الفرد من استهلاك الطاقة وعبِّر عنه بالميغاجول للشخص الواحد.

ب) احسب نصيب الفرد من استهلاك القدرة (معدّل استهلاك الطاقة) وعبّر عنه بالوات للشخص الواحد.

7.1 مذبذب توافقي كلاسيكي كتلته 3 kg، وثابت الزنبرك له 15 N/m، وأقصى إزاحة له هي 0.2m. ارسم العلاقة بين طاقة الحركة، وطاقة الوضع، والطاقة الكلية لهذا المذبذب التوافقي. ما التردد الزاوي للذبذبة (بوحدة s^{-1})، الطاقة الكلية (بالجول)؟

8.1 احسب مقدار الثابت العام للجاذبية G إذا كانت عجلة الجاذبية على سطح الأرض $g = 9.8\ m/s^2$. **تلميح**: افترض أن الأرض

كروية واستخدم نصف القطر الاستوائي للأرض كنصف قطر الكرة؟

9.1 تمتلك سيارة سباق محرّكاً عالي الأداء قدرته 550 HP. في أثناء فحص الطريق تم استخدام 80 في المئة في المتوسط من القدرة القصوى. استغرق فحص الطريق 45 دقيقة. ما مقدار الطاقة الناتجة بواسطة المحرك في أثناء فحص الطريق؟ عبِّر عن إجابتك بالميغاجول.

10.1 أ) لنتصوَّر بلداً تعداده السكاني 20 مليون نسمة. وافترض أننا نحتاج إلى 200,000 MJ للشخص الواحد سنوياً للحفاظ على دليل مقبول للتنمية البشرية بمقياس الأمم المتحدة. ما مقدار الطاقة المطلوبة سنوياً (بالميغاجول) لهذا البلد؟

ب) ما مقدار القدرة المطلوبة (بالميغاوات)؟

ج) كم محطة طاقة كهربائية بقدرة 1000 MW سنحتاج إليها لكل محطة؟

د) ما مقدار الطاقة المطلوبة يومياً (بالميغاجول)؟

هـ) افترض أن الطاقة يمكن الحصول عليها باستهلاك نفط خام ذي كثافة طاقة $37,000\ MJ/m^3$. كم برميلاً من النفط الخام سنحتاج يومياً؟

و) إذا كان سعر النفط 20 دولاراً أميركياً للبرميل الواحد (US$20/bbl)، فما تكلفة النفط لكل كيلووات ـ ساعة من الطاقة المستخدمة يومياً؟ **تلميح**: احسب مقدار الطاقة المستخدمة يومياً بالكيلووات ـ ساعة/ يوم (kWh/day) والتكلفة اليومية للنفط بالدولار/ يوم (US$/day) قبل أن تحسب تكلفة النفط لكل كيلووات ـ ساعة.

الفصل الثاني

توليد وتوزيع الطاقة الكهربائية

زَوّدت محطات الطاقة الكهربائية الولايات المتحدة بالكهرباء، وفي النهاية بقية العالم الحديث، فقط خلال قرن ونصف القرن. وعلى الرغم من استخدام أنواع أخرى من الطاقة حول العالم، فإن الكهرباء هي الشكل الأكثر تنوعاً للتوزيع على نطاق واسع. إن دور محطات الطاقة الكهربائية هو توليد التيار الكهربائي لتوزيعه عبر شبكة النقل[1]. ونوجز التطورات التاريخية التي أدت إلى النظام الحديث لتوليد وتوزيع الطاقة الكهربائية في القسم التالي[2]، نقوم بعد ذلك باستعراض لمعادلات الديناميكا الكهربية (Electrodynamics)، ومناقشة مبادئ توليد الطاقة الكهربائية، ووصف النظام الذي تم تطويره لتوزيع الطاقة الكهربائية.

1.2 التطوّر التاريخي للطاقة الكهربائية

استخدم الناس في بادئ الأمر طاقة العضلات لجمع الغذاء وبناء الملاجئ. واستُخدِمت طاقة العضلات لطحن الحبوب بالحجارة، وتقطيع الخشب بالفؤوس اليدوية، ودفع السفن العاملة بالمجداف.

وفي حالات كثيرة في التاريخ أصبح الناس المهزومون عبيداً ووفّروا طاقة العضلات لمحتلّيهم.

إن الحجارة، والفؤوس، والمجاديف من الأمثلة التي طُوِّرت لجعل طاقة العضلات أكثر فاعلية. وحلّت الدواليب المائية والطواحين الهوائية محل طاقة العضلات لطحن الحبوب منذ حوالي عام 100 قبل الميلاد. كما حلّت الرياح والأشرعة محل طاقة العضلات والسفن العاملة بالمجداف. ومحطات الطاقة الأولى كانت تدار بواسطة الرياح والمياه المتدفقة وبُنيَت في الأماكن التي كانت تتوفر فيها الرياح والمياه المتدفقة.

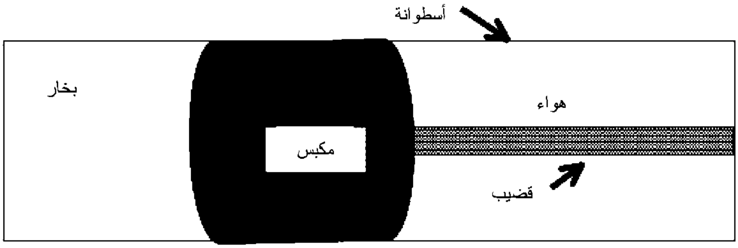
تَستخدم الأفران الحرارة لصهر المعدن الخام. والمعدن الخام هو صخر يحتوي على معادن مثل النحاس، والقصدير، والحديد، واليورانيوم. الحرارة الناتجة عن التسخين تُحرّر ذرات المعدن وتسمح لها بالتجمع في حالة تنقية. كان النحاس والقصدير أول معدنين تم صهرهما، وتم التمكن من دمجهما لتكوين البرونز.

الطاقة المتولدة بالبخار

جُمِع بين الحرارة والماء لتوليد البخار، فتم تطوير محركات بخارية لتحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة ميكانيكية. محركات البخار الأولى شغّلت مكبساً كان يوضع بين البخار المتكاثف والهواء، كما هو مبيّن في الشكل (1.2). عندما يتكاثف البخار فإنه يشغل حيّزاً أقل ويخلق فراغاً جزئياً. والهواء على الجانب الآخر للمكبس يتمدّد ويستطيع دفع المكبس. وبِحقن البخار بالتناوب والسماح له بالتكاثف، يمكن جعل المكبس يتحرك حركة خطية متذبذبة.

اخترع المخترع الإنجليزي توماس نيوكومن (Thomas Newcomen) محرّك البخار في عام 1705 وقام ببناء أول محرّك

بخاري عملي في عام 1712. ومحرّك نيوكومن البخاري استُخدِم لضخ المياه من مناجم الفحم الحجري المغمورة بالمياه. تم تكثيف البخار في محرك نيوكومن البخاري برش ماء بارد إلى داخل غرفة تحتوي على البخار، حيث كوّن التكثيف الناتج فراغاً جزئياً سمح للهواء بدفع المكبس. وبفعل الجاذبية، سحب الوزن المتصل بالقضيب المكبس إلى الخلف مما سمح بدخول البخار مرة أخرى من الجهة اليسرى للغرفة، كما هو مبيّن في الشكل (1.2).



الشكل (1.2): مخطط توضيحي لمحرّك بخاري بسيط

وقام المهندس الإسكتلندي جيمس وات (James Watt) بتحسين كفاءة محرك البخار باستخدام وعاء منفصل لجمع وتكثيف البخار المطرود. وقام مساعده وليام مردوك (William Murdock) بتطوير تصميم لنظام تروس في عام 1781 مكّنت المحرّك البخاري لتوليد حركة دائرية. والقدرة على توليد حركة دائرية جعلت من الممكن للمحرّكات البخارية أن توفّر القدرة اللازمة لإدارة عجلات. كما كان من الممكن وضع المحرّكات البخارية على حوامل متصلة بالعجلات لتوفير الطاقة لأغراض النقل. وهكذا وُلِدت التكنولوجيا المطلوبة لتطوير القاطرات المدارة بالبخار، والقوارب المدارة بعجلة التجديف، والسفن المدارة بمراوح بخارية. علاوة على ذلك، لم يكن لزاماً بناء المحرّكات البخارية بالقرب من مصدر معيّن للوقود. كما لم يكن ضرورياً بناء مرافق صناعية بالقرب من مصادر الرياح أو

المياه، والتي كانت سابقاً تستخدم لتوفير الطاقة. وكان للمصنّعين حرية بناء مصانعهم في المواقع التي ترفع من نجاح مشروعهم. وإذا ما اختاروا ذلك، فإنه يمكنهم البناء بالقرب من مناجم الفحم الحجري للتقليل من تكاليف الوقود، أو بالقرب من الأسواق لخفض تكاليف توزيع منتجاتهم.

إن الطاقة المتولّدة بالبخار كانت مصدر طاقة قذرة بيئياً. وإحراق كتلة حيوية مثل الخشب، أو وقود أحفوري مثل الفحم الحجري، عادة ما يُنتِج الحرارة اللازمة لتوليد البخار. والكتلة الحيوية والوقود الأحفوري استُخدِما أيضاً في المنازل. محاولات تلبية الطلب على الطاقة عن طريق إحراق الخشب في المقام الأول في القرن السادس عشر في بريطانيا أدت إلى إزالة الغابات والبحث عن مصدر طاقة جديد (Nef, 1977). وأصبح الوقود الأحفوري على شكل فحم حجري هو الوقود المفضّل في بريطانيا وغيرها من الدول الصناعية. وكان غاز الفحم الحجري، الذي هو أساساً الميثان، قد استُخدم في منازل القرن التاسع عشر.

لقد تزايد الطلب على الطاقة بشكل كبير بحلول القرن التاسع عشر. فالطاقة المستخدمة لطهي الطعام والتدفئة وإنارة المنازل تم توفيرها عن طريق إحراق الخشب، أو النفط، أو الشموع. وتم الحصول على النفط من مصادر مثل التسربات السطحية أو شحم الحوت. ومحطات توليد الطاقة الكهربائية بالبخار استطاعت فقط خدمة المستهلكين في المنطقة القريبة من المحطة. وكانت هناك حاجة إلى مصادر طاقة يمكن نقلها إلى المستهلكين القاطنين في أماكن بعيدة.

بحلول عام 1882، كان توماس إديسون (Thomas Edison)

يعمل على تشغيل محطة لتوليد الكهرباء في مدينة نيويورك. وولّدت محطة إديسون تياراً مباشراً ((Direct Current (DC)) بجهد كهربي قدره 110 V. وعلى الفور تبنّت دول العالم استخدام الكهرباء. وبحلول عام 1889، كانت هناك محطة لتوليد الكهرباء تعمل بقدرة واحد ميغاوات في لندن. وبدأت المصانع بالتحوَل من توليد الكهرباء الخاصة بها إلى شراء الكهرباء من شركة توليد الطاقة الكهربائية. إلا أن قصوراً أساسياً كان قد ظهر في طريقة إديسون لتوليد الطاقة الكهربائية. وهذا القصور لم يُزل حتى تم التحارب والانتصار في معركة التيارات.

معركة التيارات

إن أساس توليد وتوزيع الطاقة الكهربائية هي قصة لمعركة التيّارات، وهي معركة بين اثنين من عمالقة الأعمال: توماس إديسون وجورج ويستنغهاوس (George Westinghouse). والدافع من وراء المواجهة في ما بينهما يمكن اختصاره في مسألة أساسية واحدة: كيفية تزويد أميركا بالكهرباء.

اخترع إديسون أول مصباح عملي متوهج وكان مؤيداً لتوزيع الطاقة الكهربائية عن طريق التيار المباشر. عرض إديسون تقنيته للتيار الكهربائي المباشر في محطة شارع بيرل بمدينة نيويورك في عام 1882. وإحدى المشاكل الرئيسية مع التيار المباشر هي أنه لا يمكن نقله لمسافات بعيدة جداً دون انحطاط كبير في الطاقة.

خلافاً لإديسون، كان ويستنغهاوس من مؤيّدي التيّار المتردّد ((Alternating Current (AC)) لأنه يمكن نقله لمسافات أكبر بكثير من التيّار المباشر. والتيّار المتردّد يمكن توليده عند جهود كهربائية

منخفضة، وتحويله إلى جهود عالية لنقلها خلال خطوط القدرة، ومن ثم خفضها إلى جهود كهربائية أقل لإيصالها للمستهلك. نيكولاي تِسلا (Nikolai Tesla) (1857-1943)، وهو عالم صربي ـ أميركي ومخترع، اشتُهِر بأعماله في المغناطيسية وعمل مع ويستنغهاوس لتطوير تقنية التيّار المتردّد. عرض ويستنغهاوس تقنيته في مهرجان شيكاغو العالمي في عام 1893. وكانت المرة الأولى التي يتم فيها إضاءة حدث عالمي كبير في الليل، وعرض إمكانات التيار المتردد.

تم بناء أول محطة لتوليد الكهرباء على نطاق واسع في شلالات نياجرا بالقرب من مدينة بوفالو (Buffalo) بولاية نيويورك في تسعينيات القرن التاسع عشر (1890). بدأت محطة توليد الكهرباء في شلالات نياجرا بنقل الطاقة إلى مدينة بوفالو، على بُعد أقل من 30 كيلومتراً (20 ميلاً)، في عام 1896. واستخدمت تقنية نقل التيار المتردد. وتفوُّق تقنية التيار المتردد منحت ويستنغهاوس النصر في معركة التيارات وأصبح ويستنغهاوس أباً لصناعة القدرة الكهربائية الحديثة. لم يكن نجاح ويستنغهاوس مبنياً على أساس الفطنة في أفضل الأعمال، ولكن على اختيار التقنية الأفضل. سيتم مناقشة المبادئ الفيزيائية التي أدت إلى تبنّي تقنية التيار المتردد في الفقرات التالية.

والتسلسل الزمني للأحداث في تطوير القدرة الكهربائية مبيّن في الجدول 1.2 ([1996, Brennan [et al.)، وأوبرخت (Aubrecht)، 1995، الفصل 6]. هذه الأحداث ترجع للولايات المتحدة التي كانت الرائدة عالمياً في تطوير صناعة القدرة الكهربائية.

الجدول (1.2)

الأحداث الأولى في تاريخ صناعة القدرة الكهربائية في الولايات المتحدة

السنة	الحدث	التعليق
1882	محطة شارع بيرل، نيويورك	يطلق إديسون «عصر الكهرباء» بمحطته للقدرة الكهربائية للتيار المباشر
1893	مهرجان شيكاغو العالمي	يعرض ويستنغهاوس محطة القدرة الكهربائية للتيار المتردد على العالم
1898	صناعة القدرة الكهربائية الجديدة تبحث عن حقوق الاحتكار كخدمة منظَّمة	صاموبل إنسل (Samuel Insull) صاحب شركة شيكاغو إديسون يرتاد الصناعة لاختيار القوانين المنظمة على "المنافسة المنهِكة"
1907	تبدأ الولايات بتنظيم الخدمة	ويسكونسن ونيويورك أول ولايتين تُقرّان التشريع
1920	تبدأ الحكومة الاتحادية بتنظيم الخدمة	تشكّلت لجنة الطاقة الكهربائية الاتحادية

نمو صناعة القدرة الكهربائية

بدأت صناعة القدرة الكهربائية كمجموعة من شركات القدرة المملوكة بشكل مستقل. ونظراً إلى المبالغ الكبيرة المطلوبة لبناء بنية تحتيّة فعّالة وشاملة القدرة الكهربائية، تطَلَّب نمو صناعة القدرة الكهربائية اتحاد الشركات الأصغر للقدرة الكهربائية في مجموعات أقل ولكن بشكل أكبر. بدأت الشركات الأكبر بتنظيم توليد القدرة الكهربائية فأصبحت شركات عامة لتقديم الخدمة استطاعت أن تتحمل بناء شبكات إقليمية لنقل القدرة الكهربائية. والقدرة على الأداء بشكل أكثر فاعلية على مستويات أكبر هو مثال على اقتصاد الحجم (Economy of Scale). وشركات تقديم خدمة الكهرباء كانت قادرة على توليد وتوزيع القدرة الكهربائية بشكل أكبر وبتكلفة أقل من خلال بناء محطات وشبكات نقل أكبر للقدرة الكهربائية.

إن الحِمل (Load) على شركة تقديم خدمة الكهرباء هو الطلب على القدرة الكهربائية. وشركات تقديم الخدمة ينبغي أن تمتلك محطات لتوليد القدرة تلبي ثلاثة أنواع من الحِمل: حِمل أساسي، وحِمل متوسط أو متتالي، وحِمل ذروة. الحِمل الأساسي هو الحد الأدنى من الطلب الأساسي الذي يجب تلبيته على مدار 24 ساعة في اليوم. والحِمل المتوسط هو الطلب الذي يكون مطلوباً لعدة ساعات في اليوم ويؤول للزيادة أو النقصان ببطء. وحِمل الذروة هو الطلب الأقصى الذي يجب تلبيته على مدار 24 ساعة في اليوم.

كان تمديد القدرة الكهربائية للمدن الصغيرة والمجتمعات الريفية مكلفاً لشبكة نقل القدرة التي تطّلبت دعماً خاصاً. قدمت الحكومة الاتحادية للولايات المتحدة هذا الدعم عندما أنشأت «هيئة وادي تينيسي» (TVA) و«جمعيات كهرباء الريف» (REA).

الجدول (2.2)

استهلاك الطاقة الأساسي في عام 1999 بحسب نوع الطاقة

نوع الطاقة الأساسي	إجمالي استهلاك الطاقة العالمي
النفط	39.9 في المئة
الغاز الطبيعي	22.8 في المئة
الفحم الحجري	22.2 في المئة
الكهرومائية	7.2 في المئة
النووية	6.6 في المئة
الجيوحرارية، والشمسية، والرياح، والغابات	0.7 في المئة

المصدر: موقع إدارة معلومات الطاقة على الشبكة العنكبوتية (EIA Website, 2002).

وضع توليد القدرة الكهربائية

كانت المحطات الأولى لتوليد القدرة الكهربائية على المستوى التجاري محطات كهرومائية. والمصدر الأساسي للطاقة (الطاقة

المستخدمة لتشغيل محطة توليد القدرة) للمحطة الكهرومائية هو الماء المتدفق. واليوم، معظم الكهرباء يتم توليدها بواسطة أحد مصادر الطاقة الأساسية التالية: الفحم الحجري، أو الغاز الطبيعي، أو الطاقة النووية. يبيّن الجدول (2.2) استهلاك الطاقة الأساسية في عام 1999 كنسبة مئوية من إجمالي استهلاك الطاقة الأساسية في العالم لمجموعة من أنواع الطاقة الأساسية. وهذا الجدول يستند إلى إحصائيات محفوظة في موقع إدارة معلومات الطاقة على الشبكة العنكبوتية. يجب اعتبار هذه الإحصائية تقريبية. وقد تم اقتباسها هنا لأن إدارة معلومات الطاقة هي مصدر معياري لمعلومات الطاقة التي يتم الرجوع إليها على نطاق واسع. وتعطينا الإحصائية فكرة عن الأهمية المتعلقة بمختلف مصادر الطاقة الأساسية. وواضح أن الوقود الأحفوري كان المصدر السائد للطاقة الأساسية في نهاية القرن العشرين. والطاقة الكهربائية، على أيّ حال، هي المصدر الأكثر تنوّعاً من الطاقة لتشغيل عالم القرن الحادي والعشرين، ومعظم الطاقة يتم استهلاكها في توليد الطاقة الكهربائية.

2.2 الكهرومغناطيسية

لقد عرف الناس منذ الزمن القديم أن مواد معيّنة تستطيع أن تجذب مواد أخرى. فمثلاً، عند فرك قضيب صلب من المطاط بالصوف ومن ثم وضعه بالقرب من قصاصات صغيرة من الورق في طقس جاف سيؤدي إلى جذب القضيب لقصاصات الورق. هذا مثال واحد على ظاهرة كهربائية. والمثال الآخر مألوف لدى البعض منا الذين ساروا على سجاد في أثناء الجو البارد والجاف. وقد تستقبلنا صدمة كهربائية إذا لمسنا مقبض باب معدني.

يمكن لمواد مثل الماغنيتايت (أو حجر المغناطيس) أن تجذب

أو حتى تنفِّر مواد أخرى من دون أيّ تلامس حقيقي معها. إذا وضعت مغنطيساً صغيراً بجوار شاشة تلفازك، ستلاحظ أن صورة التلفزيون القريبة من المغناطيس أصبحت مشوّهة. هذا التشوه مثال على ظاهرة مغناطيسية. يقوم المجال المغناطيسي بحرف مسار الإلكترونات التي تصطدم بشاشة تلفزيونك.

إن الظاهرتين الكهربائية والمغناطيسية هما حالتان خاصتان من نوع عام من الظواهر المعروفة بالظواهر الكهرومغناطيسية. لقد أجرى الإنجليزي مايكل فاراداي (Michael Faraday) واحدة من أوائل الدراسات التجريبية الأكثر شمولية للظواهر الكهرومغناطيسية. وقدمت أبحاث فاراداي الكثير من البيانات التجريبية المستخدمة من قِبَل علماء آخرين لبناء نظرية رياضية للكهرومغناطيسية.

كان الرياضي والفيزيائي الإسكتلندي جيمس كليرك ماكسويل (James Clerk Maxwell) أول من نشر ما يُعتبر الآن بالصياغة الرياضية الأكثر شمولية للديناميكا الكهربائية. وباستخدام أعمال العديد من الباحثين الآخرين، بمن في ذلك فاراداي، اكتشف ماكسويل مجموعة من المعادلات التي يمكن استعمالها لوصف جميع المشاهدات الكهرومغناطيسية المعروفة آنذاك. وجمّعت معادلات ماكسويل المشاهدات التجريبية في الكهربية والمغناطيسية، وأوضحت بأن القوتين الكهربية والمغناطيسية مظهران مختلفان لقوة كهرومغناطيسية واحدة. بالإضافة إلى ذلك، استخدم ماكسويل معادلاته للتنبؤ بسرعة كبيرة ولكن محدودة للضوء. وتوقعاته أكدتها بعد ذلك التجارب المعملية.

معادلات ماكسويل

يمكن كتابة معادلات ماكسويل إما على صورة تكاملية أو

تفاضلية. صيغة التفاضل لمعادلات ماكسويل في نظام الوحدات SI هي كالتالي (Jackson, 1999, Appendix).

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad \text{((Gauss) قانون غاوس)} \qquad (2.2.1)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad \text{(قانون غاوس - مغناطيسية)} \qquad (2.2.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \text{(قانون ماكسويل - أمبير)} \qquad (2.2.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{(قانون فاراداي)} \qquad (2.2.4)$$

حيث:

$\vec{D}$ الإزاحة، بالكولوم/ متر ^{2} (C/m^2).

$\vec{P}$ كثافة الشحنة، بالكولوم/ متر ^{3} (C/m^3).

$\vec{B}$ الحث المغناطيسي، بالتسلا (Tesla).

$\vec{H}$ المجال المغناطيسي، بالأمبير/ متر (A/m).

$\vec{J}$ كثافة التيار، بالأمبير/ متر ^{2} (A/m^2).

$\vec{E}$ المجال الكهربائي، بالفولت/ متر (V/m).

الإزاحة $\vec{D}$ والمجال المغناطيسي $\vec{H}$ يعتمدان على خواص الوسط ويمكن كتابتهما على الصورة:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \qquad (2.2.5)$$

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu_0} \vec{B} - \vec{M} \qquad (2.2.6)$$

حيث:

$\vec{P}$ استقطاب مادة الوسط، بالكولوم/ متر ^{2} (C/m^2).

$\vec{M}$ = مغنطة مادة الوسط، بالأمبير/متر (A/m).

μ_0 = معامل النفاذية للفراغ = $4\pi \times 10^{-7}$ N/A^2

ε_0 = معامل السماحية للفراغ = $\frac{1}{\mu_0 c^2}$.

c = سرعة الضوء في الفراغ = $3\text{x}10^8$ m/s.

يمكن الحصول على معامل النفاذية μ ومعامل السماحية ε لوسط مادي موحّد الخواص بكتابة المعادلتين (2.2.5) و(2.2.6) على الصورة:

$$\vec{D} = \varepsilon\vec{E} \tag{2.2.7}$$

$$\vec{B} = \mu\vec{H} \tag{2.2.8}$$

للمصادر الخارجية في الفراغ، تصبح المعادلتين (2.2.7) و(2.2.8) كالتالي:

$$\vec{D} = \varepsilon_0\vec{E} \tag{2.2.9}$$

$$\vec{B} = \mu_0\vec{H} \tag{2.2.10}$$

تسمى النسبتان اللابعديتان $\varepsilon/\varepsilon_0$ وμ/μ_0 مُعامل السماحية النسبي (أو ثابت العازل) ومُعامل النفاذية النسبي، على التوالي. والمصطلحان مُعامل النفاذية ومُعامل النفاذية النسبي لهما استخدام مهم ومختلف تماماً لوصف تدفق الموائع في الأوساط المسامية (Fanchi, 2002).

والكثافة الكلية للطاقة الكهرومغناطيسية u هي:

$$u = \frac{1}{2}\left(\vec{D}\cdot\vec{E} + \vec{B}\cdot\vec{H}\right) \tag{2.2.11}$$

يعطي متجه بوينتنغ (Poynting) $\vec{S}$ تدفق الطاقة الكهرومغناطيسية

خلال وحدة مساحة في وحدة زمن:

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \tag{2.2.12}$$

ولمتجه بوينتنغ أبعاد القدرة لكل وحدة مساحة، وسُمِّي بذلك نسبة إلى عالم الفيزياء البريطاني جون هنري بوينتنغ (John Henry Poynting (1852-1914))، وهو أول من درس خصائصها. كثافة كمية التحرك للمجالات الكهرومغناطيسية، أو كمية التحرك لكل وحدة حجم هي:

$$\vec{g} = \frac{\vec{S}}{c^2} \tag{2.2.13}$$

متجه بوينتنغ وكثافة كمية التحرك للمجالات الكهرومغناطيسية في الفراغ هما:

$$\vec{S}_0 = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{\mu_0} \tag{2.2.14}$$

و:

$$\vec{g}_0 = \frac{\vec{S}_0}{c^2} = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{\mu_0 c^2} = \varepsilon_0 \vec{E} \times \vec{B} \tag{2.2.15}$$

حيث استخدمنا المعادلة (2.2.10).

ومعادلة الاستمرارية:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{J} = 0 \tag{2.2.16}$$

يمكن استنتاجها من معادلات ماكسويل وهي تعبير لبقاء الشحنة. ومعادلات ماكسويل يمكن استخدامها لتوضيح أن المجالين $\vec{E}$ و$\vec{B}$ يمثلان لمعادلة الموجة في الفراغ. ومعادلتا الموجة للمجالين $\vec{E}$ و$\vec{B}$ في الفراغ هما:

$$\nabla^2 \vec{B} = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \tag{2.2.17}$$

$$\nabla^2 \vec{E} = -\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \qquad (2.2.18)$$

حيث ∇^2 دالة لابلاس (Laplacian) $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ في الإحداثيات الديكارتية (الكارتيزية). سرعة الموجتين $\vec{E}$ و$\vec{B}$ في الفراغ هي سرعة الضوء $c = 1/\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$، وسِعتا الموجتين $\vec{E}$ و$\vec{B}$ مرتبطتان بالعلاقة $E = cB$.

تماثل معادلات ماكسويل في الكهرومغناطيسية من حيث الأهمية قوانين نيوتن في الميكانيكا. والمجموعة المكوِّنة من قوانين نيوتن ومعادلات ماكسويل تشكِّل الأساس النظري للموضوع المعروف بالديناميكا الكهربية الكلاسيكية (Classical Electrodynamics)، الذي يختص بدراسة حركة الأجسام المشحونة كهربياً. فأيّ جُسيم نقطي يحمل شحنة q ويتحرك بسرعة $\vec{v}$ في مجال كهرومغناطيسي سيخضع لقوة مقدارها:

$$\vec{F} = q\left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}\right) \qquad (2.2.19)$$

تُسمّى هذه القوة المعطاة بالمعادلة (2,2,19) قوة لورينتز (Lorentz)، وتطبيقاتها موضح بالمثالين التاليين. وقد لعبت الديناميكا الكهربية الكلاسيكية، وخاصة سرعة الضوء، دوراً رئيسياً في تطوير إينشتاين للنسبية واكتشافه للعلاقة بين الكتلة والطاقة.

مثال 1.2.2: الجسيم المشحون في مجال كهربي

القوة $\vec{F}$ المؤثرة على جُسَيم كتلته m وشحنته q يتحرك في مجال كهربي $\vec{E}$ هي:

$$\vec{F} = m\ddot{\vec{r}} = q\vec{E} \qquad (2.2.20)$$

ويمكن التعبير عن هذه المعادلة بدلالة المركّبات وإحداثيات الموضع $\{x, y, z\}$ كالتالي:

$$m\ddot{x} = qE_x$$
$$m\ddot{y} = qE_y \qquad (2.2.21)$$
$$m\ddot{z} = qE_z$$

ومركَّبات المجال الكهربي يمكن أن تكون دالة في $\{x, y, z\}$ كمثال بسيط، نفترض أن المجال الكهربي ثابت واتجاهه على طول المحور z بحيث $\{E_x, E_y, E_z\} = \{0,0,E_c\}$ ستصبح معادلات الحركة على الشكل التالي:

$$m\ddot{x} = 0$$
$$m\ddot{y} = 0 \qquad (2.2.22)$$
$$m\ddot{z} = qE_c$$

ستكون عجلة جُسَيم ذات شحنة موجبة نتيجة المجال الكهربي ثابتة وفي اتجاه المجال الكهربي، أي إن:

$$\ddot{z} = \frac{qE_c}{m} \qquad (2.2.23)$$

ومسار الجُسَيم سيكون على النحو التالي:

$$x = x_0 + v_{x_0}t$$
$$y = y_0 + v_{y_0}t \qquad (2.2.24)$$
$$z = z_0 + v_{z_0}t + \frac{1}{2}\frac{qE_c}{m}t^2$$

حيث $\{x_0, y_0, z_0\}$ هي الموضع الابتدائي للجسيم و$\{v_{x_0}, v_{y_0}, v_{z_0}\}$ السرعة الابتدائية للجسيم.

مثال 2.2.2: الجسيم المشحون في مجال مغناطيسي

القوة $\vec{F}$ المؤثرة على جُسَيم كتلته m وشحنته q يتحرك بسرعة $\vec{v}$ في مجال مغناطيسي ساكن له حث مغناطيسي $\vec{B}$ هي:

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}) \qquad (2.2.25)$$

حيث $\vec{B} \times \vec{v}$ الضرب الاتجاهي للسرعة بالحث المغناطيسي.

لنفترض أن الحث المغناطيسي منتظم وموازٍ للمحور z بحيث $\vec{B} = B_c\hat{k}$ لمتجه الوحدة $\hat{k}$ الموازي للمحور z. معادلات الحركة للجُسَيم ستكون على الصورة:

$$m\ddot{\vec{r}} = q\left(\vec{v} \times B_c\hat{k}\right) = qB_c \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ \dot{x} & \dot{y} & \dot{z} \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \qquad (2.2.26)$$

أو:

$$m\left(\ddot{x}\hat{i} + \ddot{y}\hat{j} + \ddot{z}\hat{k}\right) = qB_c\left(\dot{y}\hat{i} - \dot{x}\hat{j}\right) \qquad (2.2.27)$$

هذه المعادلة المتجهية يمكن فصلها إلى ثلاث معادلات بمساواة المركِّبات المتجهية، أي إن:

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= qB_c\dot{y} \\ m\ddot{y} &= -qB_c\dot{x} \\ m\ddot{z} &= 0 \end{aligned} \qquad (2.2.28)$$

وهذه النتيجة تعني أن الجُسَيم لا يتسارع في اتجاه المجال المغناطيسي. تسارع الجُسَيم سيكون في المستوى المستعرض لاتجاه الحركة.

يوضح حل معادلات الحركة أن الجُسَيم سيتبع مساراً لولبياً إذا كانت مركِّبات سرعته على طول اتجاه المجال المغناطيسي لا تساوي صفر. وإذا كانت $v_z = z = 0$ في مثالنا، فإن الجُسَيم سيتحرك في مسار دائري في المستوى x-y بسرعة نصف قطرية ثابتة v_r. ويمكننا حساب نصف قطر المسار بمساواة مقدار القوة المغناطيسية مع قوة الجذب المركزية كالتالي:

$$qv_rB_c = \frac{mv_r^2}{r} \qquad (2.2.29)$$

أو:

$$r = \frac{mv_r}{qB_c} \qquad (2.2.30)$$

يتناسب نصف قطر المسار مع مقدار كمية التحرك mv_r للجُسَيم. ويمكن كتابة السرعة نصف القطرية بدلالة نصف القطر r والتردد الزاوي على الصورة التالية:

$$\omega_c = \frac{qB_c}{m} \tag{2.2.31}$$

بحيث:

$$v_r = \omega_c r \tag{2.2.32}$$

يُسمّى التردد الزاوي ω_c بالتردد السيكلوتروني. ويستخدَم التردد السيكلوتروني في تصميم معجّلات الجُسَيمات وتطوير بعض أنواع مفاعلات الاندماج النووي.

الجهدان القياسي والمتجهي

يمكن كتابة المجالين الكهربي والمغناطيسي بدلالة الجهد الكهربي Φ والجهد المتجهي A مستخدمين العلاقتين التاليتين:

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla\Phi \tag{2.2.33}$$

و:

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \tag{2.2.34}$$

يُسمّى الجهد الكهربي أيضاً بالجهد القياسي. والجهدان القياسي والمتجهي لهما خصائص عديدة هامة ولكنها خارج نطاق هذا الكتاب. سنتعرض للجهدين مرة أخرى عند مناقشتنا لمعادلات ميكانيكا الك.

3.2 عناصر دوائر التيار المتردد

رأينا في القسم 1.2 أن التيار الكهربائي المتردّد يؤدّي دوراً هاماً

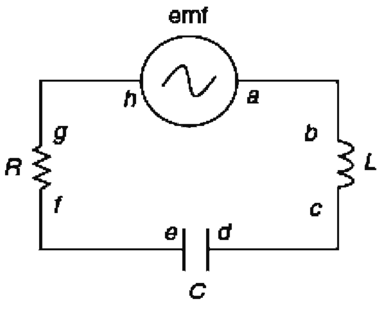
في صناعة اليوم للطاقة الكهربائية. ويتم الاحتياج إلى التيارات المتردّدة من أجل توليد الطاقة الكهربائية ونقلها بكفاءة على مسافات كبيرة. وقبل أن نتحدث في هذين الموضوعين، سنستعرض في هذا القسم العناصر الأساسية لدوائر التيار المتردد. بعد ذلك يمكننا تقديم مناقشة موسَّعة عن توليد ونقل الطاقة الكهربائية.

التيار في دائرة التوالي LCR

يوضِّح الشكل (2.2) بعض العناصر الأساسية لدائرة تيار متردد. هذه العناصر تشمل قوة دافعة كهربية مترددة (emf)، ومِحث (L)، ومكثف (C)، ومقاومة .(R) هدفنا هنا هو حل معادلات دائرة التوالي LCR للتيار i المعتمد على الزمن[3].

مجموع فروق الجهد الكهربي عبر جميع عناصر الدائرة LCR يحقق المعادلة التالية:

$$V_{ha} = V_{bc} + V_{de} + V_{fg} \qquad (2.3.1)$$



الشكل (2.2): دائرة LCR على التوالي

يتولد التيار المتردد في دائرة التوالي LCR بتطبيق فرق جهد

متردد V_{ha} بين النقطتين h وa في الشكل (2.2). أي إننا نقوم بتطبيق فرق الجهد المتردد التالي:

$$V_{ha} = \varepsilon_{emf} \sin \omega t \qquad (2.3.2)$$

حيث التردد الزاوي ω هو تردد الذبذبة للقوة الدافعة الكهربية. وتردد الذبذبة $\nu = \omega/2\pi$ للتيار المتردد التجاري في الولايات المتحدة هو عادة 60 Hz أو $\omega = 377\ s^{-1}$. الجهد الثابت ε_{emf} هو الجهد الابتدائي، أي الجهد عند الزمن $t = 0$. وفرق الجهد Vbc عبر المِحث هو:

$$V_{bc} = L\frac{di}{dt} \qquad (2.3.3)$$

للتيار الكهربائي i والحث الثابت L. وفرق الجهد V_{de} عبر المكثف هو:

$$V_{de} = \frac{q}{C} \qquad (2.3.4)$$

للشحنة q والسعة الثابتة C. وعلاقة التيار بالشحنة هو تفاضل الشحنة بالنسبة إلى الزمن، أي إن:

$$i = \frac{dq}{dt} \qquad (2.3.5)$$

وأخيراً، يعطينا قانون أوم (Ohm) فرق الجهد V_{fg} عبر المقاومة على النحو التالي:

$$V_{fg} = iR \qquad (2.3.6)$$

للمقاومة الثابتة R.

يمكن الحصول على التيار لدائرة التوالي LCR بتعويض المعادلات (2.3.2) إلى (2.3.6) أولاً في المعادلة (2.3.1) لإيجاد:

$$\varepsilon_{emf} \sin \omega t = L\frac{di}{dt} + \frac{q}{C} + iR \qquad (2.3.7)$$

إذا فاضلنا المعادلة (2.3.7) بالنسبة إلى الزمن، سنحصل على المعادلة التفاضلية التالية للتيار بعد إعادة ترتيب حدودها:

$$L\frac{d^2i}{dt^2}+R\frac{di}{dt}+\frac{1}{C}i=\varepsilon_{emf}\omega\cos\omega t \qquad (2.3.8)$$

أحد الحلول للمعادلة (2.3.8) هو:

$$i(t)=a\cos\omega t+b\sin\omega t \qquad (2.3.9)$$

حيث المعاملان a وb هما:

$$a=\frac{\varepsilon_{emf}X}{R^2+X^2},\ b=\frac{\varepsilon_{emf}R}{R^2+X^2} \qquad (2.3.10)$$

حيث:

$$X\equiv X_C-X_L,\quad X_C=\frac{1}{\omega C},\quad X_L=L\omega \qquad (2.3.11)$$

تسمى المعاملات X، وX_L، وX_C بالمفاعلة، والمفاعلة الحثية، والمفاعلة السعوية، على التوالي. وجذر المقام في المعادلة (2.3.10) هو المعاوقة Z. ويمكن كتابة المعاوقة كالتالي:

$$Z=\sqrt{R^2+X^2}=\sqrt{R^2+(X_C-X_L)^2}=\sqrt{R^2+\left(\frac{1}{\omega C}-L\omega\right)^2} \qquad (2.3.12)$$

المفاعلتان والمعاوقة لهما وحدات المقاومة، وهو الأوم في نظام الوحدات SI.

وهناك حلان آخران للمعادلة (2.3.8) يظهران في المؤلفات العلمية هما:

$$i(t)=i_0\sin(\omega t-\delta) \qquad (2.3.13)$$

$$i(t)=i_0\sin(\omega t+\phi) \qquad (2.3.14)$$

i_0 هي القيمة القصوى للتيار وتعطى بالعلاقة:

$$i_0=\frac{\varepsilon_{emf}}{\sqrt{R^2+X^2}} \qquad (2.3.15)$$

وزاويتا الطور وهما:

$$\delta = \tan^{-1}\left(-\frac{X}{R}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{X_C - X_L}{R}\right) = \tan^{-1}\left(-\frac{\frac{1}{\omega C} - \omega L}{R}\right) = -\phi \qquad (2.3.16)$$

الطريقة السهلة نسبياً للتحقق من أن المعادلتين (2,3,13) و(2.3.14) هما حلان للمعادلة (2.3.8) هي أن نستخدم الخصائص المثلثية وذلك لتحويل المعادلة (2.3.9) إلى إحدى أشكال المعادلتين (2.3.13) أو(2.3.14).

القدرة الكهربية في دائرة التوالي LCR

يعتمد التدفق الصافي للطاقة في دائرة التوالي *LCR* على كيفية تشغيلها. لنفترض أن الدائرة *LCR* تم تشغيلها في حالة الاستقرار بحيث لا يتغيّر متوسط الطاقة المختزنة في المكثف والمِحث. تتحول الطاقة الكهرومغناطيسية في المقاومة إلى طاقة حرارية. ومعدل التحوّل للطاقة الكهرومغناطيسية في المقاومة هو القدرة الكهربية. أي إن:

$$P(t) = i^2 R = [i_0 \sin(\omega t + \phi)]^2 R \qquad (2.3.17)$$

وهذا التدفق للطاقة يمكن تسميته بتسخين جول لأن القدرة هي على شكل قانون جول للتسخين الكهربائي للمقاومة $P = i^2 R$، أي إن من وجهة نظر أيّ شركة طاقة كهربائية، تسخين جول يعتبر فقد للطاقة الكهرومغناطيسية إلى طاقة حرارية.

ومتوسط القدرة، أو التدفق الصافي للطاقة، في دائرة التوالي *LCR* يعطى بالعلاقة التالية:

$$P_{av} = (i_{rms})^2 R \qquad (2.3.18)$$

حيث i_{rms} جذر متوسط مربع التيار، أو:

$$i_{rms} = \sqrt{\frac{i_0^2}{2}} = \frac{i_0}{\sqrt{2}} \qquad (2.3.19)$$

المعامل $\sqrt{2}$ في المقام يظهر من متوسط الحد $\sin(\omega t + \phi)$ في المعادلة (2.3.17). جذر متوسط مربع فرق الجهد هو:

$$\varepsilon_{rms} = \frac{\varepsilon_{emf}}{\sqrt{2}} \qquad (2.3.20)$$

جذرا متوسط مربع التيار وفرق الجهد i_{rms}، ε_{rms} يمكن لكتابة متوسط القدرة للتيار المتردد في دائرة التوالي *LCR* على الصورة المكافئة التالية:

$$P_{av} = \varepsilon_{rms}\, i_{rms} \cos\phi \qquad (2.3.21)$$

يُسمّى المعامل المثلثي $\cos\phi$ عامل القدرة. والقيمة القصوى لعامل القدرة هو 1.

إن عامل القدرة دالة في المعاوقة والمقاومة. ويمكننا توضيح اعتماد عامل القدرة على المعاوقة والمقاومة باستخدام المعادلة (2.3.12) للمعاوقة بكتابة عامل القدرة على النحو التالي:

$$\cos\phi = \frac{R}{Z} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (X_C - X_L)^2}} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (1/\omega C - L\omega)^2}} \qquad (2.3.22)$$

يحدث الرنين في دائرة التوالي *LCR* عندما تتساوى المفاعلة السعوية مع المفاعلة الحثية. وبدلالة التردد الزاوي، فإن شرط حدوث الرنين في دائرة التوالي *LCR* هو:

$$X_C - X_L = \frac{1}{\omega C} - L\omega = 0 \qquad (2.3.23)$$

وبحل هذه المعادلة من أجل التردّد الزاوي، نجد أن الرنين يتحقق عندما يحقق التردّد الزاوي المعادلة التالية:

$$\omega_{resonance} = \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \qquad (2.3.24)$$

دائرة التوالي *LCR* بتردد زاوي لمولد التيار المتردد مساويًا

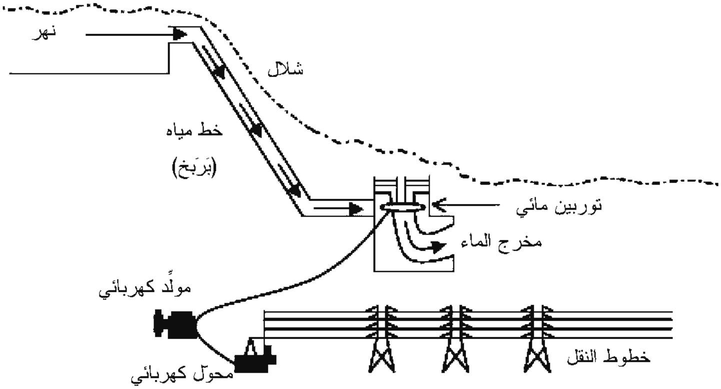
للتردد الزاوي الرنيني ستعطينا معامل قدرة $\cos\phi = 1$. ومتوسط القدرة الناتج هو متوسط القدرة الأقصى، أي إن $P_{av} = \varepsilon_{rms} i_{rms}$ لأن $\cos\phi = 1$.

مثال 1.3.2: التعيير للأجهزة الكهربائية

التعيير للأجهزة الكهربائية يُعبَّر عنه عادة بدلالة قيمتي متوسط القدرة وجذر متوسط المربع للمتغيرات الكهربائية. فمثلاً، الجهد النموذجي لأيّ جهاز كهربائي في الولايات المتحدة هو $\varepsilon_{rms} = 120V$ يمكن تعيير مجفّف شعر عند متوسط القدرة 1500 W لجذر متوسط مربع الجهد 120 V. وإذا كان عامل القدرة يساوي 1، فإن القيمة المقابلة لجذر متوسط مربع التيار هي $i_{rms} = 12.5A$.

4.2 توليد الطاقة الكهربائية

اعتمدت معظم المحطات التجارية الأولى لتوليد الطاقة الكهربائية على تدفق المياه كمصدر أساسي للطاقة. وقد عرف الناس لبعض الوقت أن الشلالات يمكن استخدامها لتوليد الطاقة الكهربائية. يبيّن الشكل (3,2) رسماً توضيحياً لمحطة طاقة كهرومائية. تتدفق المياه من المستوى الأعلى إلى المستوى الأدنى خلال خط أنبوب لضبط تدفق المياه يُسمّى بَربَخ (Penstock). يقوم التيار المائي بإدارة توربين متصل بمولّد. يُسمّى التوربين بالمحرّك الأساسي لأنه يدير عمود المولد. ويدير التوربين الدائر عموداً متصلاً إما بمغناطيس مجاور لملف أو بملف مجاور لمغناطيس. الطاقة الميكانيكية للشلال تتحول إلى طاقة حركة لدوران التوربين. مولد التيار المتردّد يحوّل الطاقة الميكانيكية إلى طاقة كهربائية باستخدام بعض المبادئ الفيزيائية الأساسية[4].



الشكل (3.2): رسم توضيحي لمحطة توليد طاقة كهرومائية

ينشأ مجال مغناطيسي نتيجة تدفق الجُسَيمات المشحونة في السلك. ويبيّن الشكل (4.2) المجال المغناطيسي الناشئ عن سريان التيار الكهربائي في سلك الملف. يمكن بناء مولد تيار كهربائي متردد بسيط من حلقة مصنوعة من سلك يتم تدويرها في مجال مغناطيسي ثابت. الفيض المغناطيسي هو مقياس لعدد خطوط المجال المغناطيسي التي تمر خلال مساحة الحلقة. فإذا كانت الحلقة تدور بتردّد زاوي ω في مجال مغناطيسي منتظم شدته B فإنها ستولِّد فيضاً مغناطيسياً متغيراً مع الزمن مقداره هو:

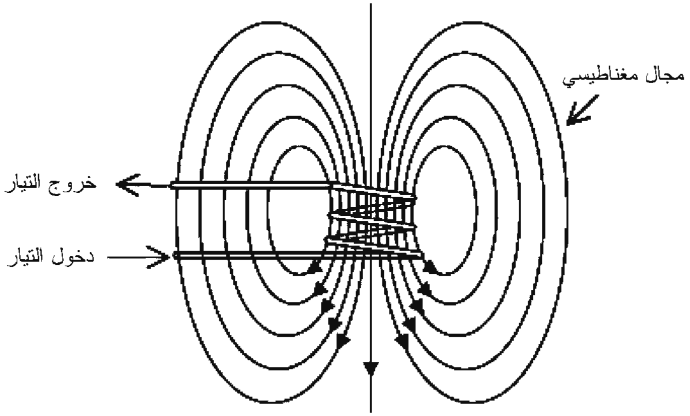
$$\Phi_B = BA\cos\omega t \qquad (2.4.1)$$

حيث A مساحة الحلقة، وt الزمن. ينص قانون فاراداي للحث على أن قوة دافعة كهربية ε_{emf} تتولد تأثُّرياً في الدائرة نتيجة تغيُّر الفيض المغناطيسي مع الزمن. وتتناسب القوة الدافعة الكهربية مع المعدل الزمني لتغيّر الفيض المغناطيسي خلال الدائرة.

إن القوة الدافعة الكهربية لمولِّد تيار كهربائي متردد بسيط

يحتوي على عدد N حلقة يمكن حسابها من قانون فاراداي للحث على النحو التالي:

$$\varepsilon_{\text{emf}} = -N\frac{d\Phi_B}{dt} = NBA\omega\sin\omega t \qquad (2.4.2)$$



الشكل (4.2): الكهرومغناطيسية

الإشارة السالبة في المعادلة (2.4.2) مطلوبة لتحقيق قانون لنز (Lenz) الذي ينص على أن القوة الدافعة الكهربية المتولدة تأثُّرياً تُنتِج تياراً يولِّد مجالاً مغناطيسياً يعارض التغير في كثافة الفيض المغناطيسي خلال الحلقة. القوة الدافعة الكهربية القصوى هي $(\varepsilon_{\text{emf}})_{\max} = NBAW$ والقوة الدافعة الكهربية ε_{emf} تولِّد تياراً كهربائيّا تأثُّرياً $I=\varepsilon_{\text{emf}}/R$ في دائرة خارجية مقاومتها R. يتم تمرير التيار التأثُّري في شبكة النقل للتوزيع على المستهلكين.

إن كفاءة محطة الطاقة الكهربائية η_{Power} هي النسبة بين القدرة الخارجة (Output Power) إلى القدرة الداخلة (Input Power)، أي إن:

$$\eta_{Power} = \frac{\text{القدرة الخارجية}}{\text{القدرة الداخلية}} \qquad (2.4.3)$$

ويتطلّب التقييم الشامل لمحطة توليد طاقة التيار الكهربائي المتردد معرفة بكلٍ من عامل القدرة وكفاءة المحطة.

مثال 1.4.2: أداء محطة الطاقة الكهربائية

تستخدم محطة الطاقة الكهربائية ذات القدرة 100 MW خط نقل 500 kV لتوصيل الكهرباء إلى المستهلك. مقدار التيار في خط النقل المحسوب من معادلة متوسط القدرة $P_{av} = \varepsilon_{rms}\, i_{rms}$ لأقصى معامل قدرة هو $i_{rms} = 200A$. إذا كان معامل القدرة 0.9 بدلاً من 1، فإن التيار المحسوب من المعادلة (2.3.21) هو $i_{rms} = 222A$. وإذا لزم محطة طاقة قدرتها 120 MW أن تولّد 100 MW، فإن كفاءة المحطة هي $\eta_{Power} = 100\ MW/120\ MW = 0.83$ أو 83%.

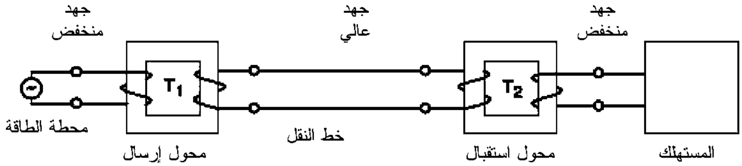
مثال 2.4.2: التعيير لمحطة الطاقة الكهربائية

يمكن تعيير مولّدات التيار المتردد بدلالة الجهد ـ أمبير، أو الجهد (بالفولت (V)) مضروباً في التيار (بالأمبير (A)). فمثلاً، التعيير لمولد تيار متردّد يوفّر تياراً مقداره 100 A عند جهد قدره 100 kV هو 1000 kVA.

المحوّلات الكهربائية

لقد لزم بناء محوّلات كهربائية لاستخدام التيار المتردد. والمحول الكهربائي هو جهاز يستطيع تحويل الجهد الكهربي الصغير للتيار المتردد إلى جهد كهربي أكبر، أو العكس. على سبيل المثال، يفضّل العمل بجهود كهربائية صغيرة نسبياً في محطة الطاقة الكهربائية وتوفير مدى واسع من الجهود الكهربائية للمستهلك. وبينهما، في

خط النقل، يتطلب جهداً كهربائياً عالياً للتقليل من الفقد الحراري المقاومي في خط النقل. تقوم المحوّلات بوظيفة تحويل الجهد الكهربي. فالمحول الذي يرفع الجهد الكهربي يُسمّى «محوّل رفع» (Step-Up Transformer)؛ والمحوّل الذي يخفض الجهد الكهربي يُسمّى «محوّل خفض» (Step-Down Transformer). في الشكل (5.2)، المحول T_1 هو محوّل رفع من الجهد المنخفض في محطة الطاقة الكهربائية إلى جهد عال في خط النقل. والمحوّل T_2 في هذا الشكل هو محول خفض يقوم بتحويل الجهد العالي نسبياً في خط النقل إلى جهد أقل مناسب للمستهلك. الجهدان المنخفضان المبيّنان في الطرفين المتقابلين لخط النقل لا يشترط أن يكونا متساويين. والجهد الفعلي المستخدم في خط النقل يعتمد على خصائص المحول. الجهود الكهربائية النموذجية في خط النقل يمكن أن تتراوح من أقل من 100,000 V إلى أعلى من 750,000 (Wiser, 2000, p. 197) V.



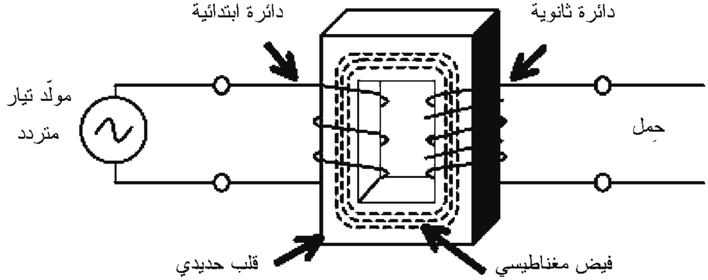
الشكل (5.2): نقل الطاقة الكهربائية

يبيّن الشكل (6.2) محوّل تيار متردد بسيط. ويتكوّن المحول من ملفين لُفَّ سلكاهما حول قلب حديدي. الملف المتصل بمولّد التيار المتردد يُسمّى بالملف الابتدائي ويحتوي على عدد N_1 لفة؛ والملف الآخر هو الملف الثانوي ويحتوي على عدد N_2 لفة. والقلب الحديدي يوفّر وسطاً لإيصال الفَيض المغناطيسي Φ_B من الملف

الابتدائي خلال الملف الثانوي. المعدل الزمني لتغير الفَيض المغناطيسي متساوي تقريباً في كِلا الملفين، وبالتالي فإن الجهدين الكهربائيين التأثُّريين يمكن كتابتهما على النحو التالي:

$$V_1 = -N_1 \frac{d\Phi_B}{dt}, \quad V_2 = -N_2 \frac{d\Phi_B}{dt} \qquad (2.4.4)$$

الرقم السفلي 1 يشير إلى المحول الابتدائي في الدائرة الابتدائية والرقم السفلي 2 يشير إلى الملف الثانوي في الدائرة الثانوية. ومن الجدير ملاحظته هنا أن الفَيض المغناطيسي في دائرة التيار المباشر لا يتغيّر، وبالتالي فإن تفاضل الفَيض المغناطيسي بالنسبة إلى الزمن يساوي صفراً. لهذا السبب، فإن المحولات لا تعمل مع دوائر التيار المباشر، وهو القصور الأساسي في خطة إديسون لتوليد وبيع طاقة التيار الكهربائي المباشر.



الشكل (6.2): محوّل جهد بسيط

يمكننا الحصول على نتيجة مفيدة من المعادلة (2.4.4) بمساواة اشتقاق الفَيض المغناطيسي بالنسبة إلى الزمن $d\Phi_B/ dt$ والنتيجة هي:

$$V_2 = V_1 \frac{N_2}{N_1} \qquad (2.4.5)$$

فإذا كان عدد لفات الملف الثانوي أكبر من عدد لفات الملف الابتدائي، أي إن $N_2/N_1 > 1$، فإن الجهد الكهربي في الدائرة الثانوية

سيكون أكبر من الجهد الكهربي في الدائرة الابتدائية. وهذا هو الوضع في الشكل (5.2) عندما يتم رفع الجهد المنخفض في محطة الطاقة الكهربائية إلى جهد عال في خط النقل. وعلى العكس من ذلك، يمكن خفض الجهد الكهربي في الدائرة الثانوية أقل من الجهد الكهربي في الدائرة الابتدائية بجعل عدد لفات الملف الثانوي أقل من عدد لفات الملف الابتدائي، أي إن $N_2/N_1 < 1$ وهذا هو الوضع في الشكل (5.2) عندما يتم خفض الجهد العالي في خط النقل إلى جهد أقل لبيعه للمستهلك.

يتطلّب حفظ الطاقة بأن تكون القدرة الداخلة إلى الملف الابتدائي مساوية للقدرة الخارجة من الملف الثانوي. أي إن:

$$I_2V_2 = I_1V_1 = \text{القدرة} \qquad (2.4.6)$$

حيث I_1 وI_2 التياران في الملف الابتدائي والثانوي على التوالي. وتبيّن المعادلة (2.4.6) أن القدرة الكهربية يمكن إبقاؤها ثابتة فقط إذا رافق زيادة في الجهد في الملف الثانوي بالنسبة إلى الملف الابتدائي انخفاض في التيار في الدائرة الثانوية بالنسبة إلى التيار في الدائرة الابتدائية.

مثال 4.3.2: تصميم محوّل خفض

لنفترض أنه تم تصميم محول خفض ليحوّل 88 kV إلى 240 V. الجهد الكهربي في الدائرة الثانوية يجب أن يكون أقل بكثير من الجهد الكهربي في الدائرة الابتدائية. لذلك فإن النسبة بين عدد لفات الملف الابتدائي إلى عدد لفات الملف الثانوي ستكون على النحو التالي:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{88000\ \text{V}}{240\ \text{V}} \approx 367 \qquad (2.4.7)$$

5.2 توزيع الطاقة الكهربائية

تُستخدَم خطوط النقل الكهربائي لتوزيع الطاقة الكهربائية. الفقد الحراري المقاومي في خط النقل يمكن تقديره باستخدام المعادلة (2.3.21). خط النقل العادي، مثل كابل الكهرباء تحت الطرق السريعة في أميركا، يمكن اعتباره تقريباً دائرة توالي LCR بمقاومة واحدة فقط. في هذه الحالة، يمكننا إلغاء المِحث والمكثف بحيث إن المعاوقة ستكون نتيجة المقاومة فقط، أي إن $Z \rightarrow R$ عامل القدرة لمقاومة متصلة على التوالي مع مولد تيار متردد يصبح $\cos \varnothing = 1$ ومتوسط القدرة هو $P_{av} = \varepsilon_{rms}\, i_{rms}$ والمقاومة في هذه الحالة هي مقاومة لتدفق الإلكترونات خلال سلك التوصيل لخط النقل.

إذا عرفنا أن مقاومة خط النقل هي المقاومة لكل وحدة طول من الخط Λ_R، فإنه يمكننا حساب الفقد في القدرة نتيجة التسخين المقاومي لأيّ طول ℓ_{TL} من خط النقل. في هذه الحالة، يمكن كتابة المعادلة (2.3.19) على النحو التالي:

$$P_{av} = (i_{rms})^2 \Lambda_R \ell_{TL} \qquad (2.4.7)$$

نلاحظ هنا أن الفقد في القدرة يزداد مع زيادة طول خط النقل ومربع التيار i_{rms}. ويمكن تطبيق المعادلة (2.5.1) على كلٍّ من خطوط النقل للتيار المتردد والتيار المباشر.

بشكل عام، يرغب المجتمع التقليل من الفقد في القدرة نتيجة التسخين وذلك من أجل زيادة مقدار الطاقة الأساسية الواصلة إلى المستهلك من محطة الطاقة الكهربائية. ويمكننا خفض الفقد في القدرة بخفض التيار أو بخفض مسافة النقل. في معظم الأحيان، خفض مسافة النقل ليس خياراً عملياً، إلا أنه من الممكن تنفيذ ذلك. على سبيل المثال، يمكنك اختيار بناء منشأة صناعية بالقرب من

محطة طاقة كهربائية للتقليل من تكلفة نقل الطاقة الكهربائية. إلا أن أحد تبعات هذا القرار قد يكلِّف صاحب المصنع زيادة في تكاليف نقل بضائعه إلى السوق.

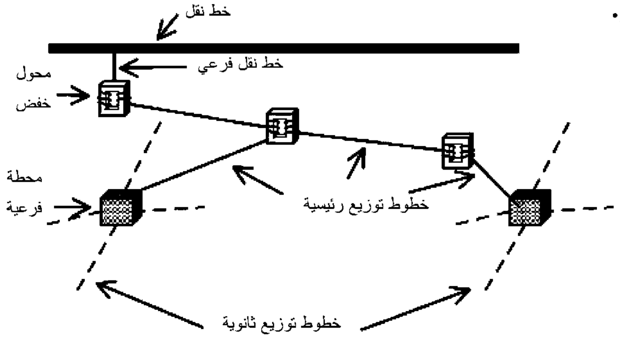
إن الخيار الأكثر عملياً للتقليل من الفقد في القدرة هو خفض التيار الذي يجب نقله عبر خطوط النقل. والفقد في القدرة يعتمد بشكل أكبر على التيار أكثر من مسافة النقل لأن المعادلة (2.5.1) تبيّن أن الفقد في القدرة يتناسب مع مربع التيار. وهذا يقدّم لنا تفسيراً فيزيائياً عن سبب كون مفهوم إديسون للتيار المباشر غير جذاب بنفس مقدار مفهوم ويستنغهاوس للتيار المتردد. والمحوّلات الكهربائية لا تعمل بالتيار المباشر لأنه ليس هناك تغير زمني للفيض المغناطيسي، لذلك فإن نقل التيار المباشر يتعرض لفقد مقاومي في الطاقة الكهربائية استناداً إلى التيار المباشر المتولد في محطة الطاقة الكهربائية. والغرض من المحولات هو خفض قيمة جذر متوسط مربع التيار في خط النقل، وهو ممكن مع التيار المتردد.

وخيار المستقبل هو استخدام المواد فائقة التوصيل (Superconductors) كخطوط نقل. والمواد فائقة التوصيل هي مواد غير مقاومة لتدفق الإلكترونات[5]. وقد اكتشف الفيزيائي الهولندي هانس كاميرلنغ أُونس (Hans Kamerlingh Onnes) (1853-1926) أول مادة فائقة التوصيل في عام 1911. قام أُونس بإنتاج الهليوم السائل بتبريد الهليوم إلى درجة حرارة 4.2 K. ولاحظ بعد ذلك أن مقاومة الزئبق تتلاشى عند تبريده بواسطة الهليوم السائل. وقد تم تطوير مواد فائقة التوصيل تعمل عند درجات حرارة أعلى من 4.2 K، إلا أنها مازالت تعمل فقط عند درجات حرارة أقل بكثير من درجة حرارة الغرفة. والمواد فائقة التوصيل لم تعد عملية للاستخدام على نطاق واسع في نقل الطاقة الكهربائية لأنها تتطلب تبريداً باهظ الثمن.

نظام النقل والتوزيع

تتصل محطات توليد الطاقة الكهربائية بأحمال (مستهلكين) عن طريق نظام نقل يشمل خطوط نقل ومحطات فرعية[6]. والمحطات الفرعية هي نقاط في شبكة النقل تعمل على تمرير الطاقة الكهربائية إلى الأحمال بجهد كهربي مناسب. يبيّن الشكل (7.2) العناصر الأساسية لنظام نقل الطاقة الكهربائية. جهود النقل النموذجية في الولايات المتحدة تتراوح من 69 kV إلى 765 kV، وتردد التيار المتردد هو 60 Hz. البنية التحتية لتوفير الطاقة الكهربائية للأحمال من المحطات الفرعية هي نظام التوزيع. وأيّ عطل في نظام نقل الطاقة الكهربائية يمكن أن يترك ملايين الناس من دون كهرباء، مثلما حدث في إظلام عام 2003 في شمال أميركا وإيطاليا.

ويتم نقل وتوزيع الطاقة الكهربائية تجارياً بتشغيل نظام ثلاثي الطور. والكهرباء ثلاثية الطور تشير إلى التيار والجهود المختلفة في الطور مع بعضها بعضاً بزاوية 120 درجة. ويستخدم مولد تيار متردّد ثلاثي الأطوار لإنتاج الكهرباء ثلاثية الطور. كما يمكن تطبيق معادلات القدرة والمعاوقة المذكورة في القسم السابق على كل طور من أطوار الكهرباء ثلاثية الطور. ويبيّن الشكل (8.2) خطوط النقل للكهرباء ثلاثية الطور.



الشكل (7.2): نظام نقل الطاقة الكهربائية

يمكن توزيع الكهرباء ثلاثية الطور إلى ثلاثة أحمال أحادية الطور باستخدام ثلاثة موصّلات منفصلة. الموصّلات مصممة بمساحات صغيرة للتقليل من كمية المادة الموصلة، مثل النحاس، التي يجب شراؤها وتركيبها في موضعها. وخطوط النقل ثلاثية الطور مصممة للعمل عند جهود كهربية عالية وتيارات منخفضة. وتُستخدَم محوّلات عالية الجهد لخفض الجهد الكهربي من أجل الاستخدام من قِبَل المستهلكين.

الشكل (8.2): خطوط النقل للكهرباء ثلاثية الطور

يبيّن الشكل (9.2) محوّلاً نموذجياً مركب قطبياً. يستطيع المحوّل أن يحوّل الكهرباء ثلاثية الطور عند جهد توزيع 13.8 kV إلى جهود أحادية الطور مناسبة للمستهلكين. تستخدم المنازل السكنية في الولايات المتحدة عادة جهداً أحادي الطور 120 V للأجهزة الصغيرة و240 V للأجهزة الأكبر مثل مجفّفات الملابس. ويمكن للمصانع الكبرى أن تستخدم جهداً ثلاثي الطور في حدود 2160 V أو أعلى .

الشكل (9.2): محوّل مركب قطبياً

الدوائر الكهربائية في المنازل

إن المنازل هي من بين المستهلكين الأكثر شيوعاً للكهرباء في العصر الحديث. ويتم إيصال الكهرباء كتيار متردد إلى المنزل العادي في الولايات المتحدة إما باستخدام سلك ذي خطين أو سلك ذي ثلاثة خطوط[7]. فرق الجهد الكهربي، أو جذر متوسط مربع الجهد، بين السلكين في السلك ذي الخطين في الولايات المتحدة هو 120 V وفي معظم أجزاء أوروبا 240 V. يتم توصيل أحد السلكين في السلك ذي الخطين إلى الأرضي في المحوّل والسلك الآخر هو السلك «المكهرَب». والسلك ذو الخطوط الثلاثة له خط متعادل غير مكهرَب، وخط 120 V +، وخط 120V-.

يتم توصيل عدّاد على التوالي إلى خطوط القدرة لقياس كمية الكهرباء المستهلكة بواسطة المنزل. وبالإضافة إلى العدّاد، يتم توصيل قاطع دائرة (Circuit Breaker) على التوالي إلى خطوط القدرة لتوفير حاجز أمان بين المنزل وخط القدرة. وقد يُستخدَم مِصهَر (Fuse) بدلاً من قاطع الدائرة في البيوت القديمة. ويحتوي المِصهَر

على وصلة من سبيكة معدنية، مثل الرصاص والقصدير، بدرجة حرارة انصهار منخفضة. فإذا ارتفعت حرارة السبيكة بشكل كبير نتيجة التسخين المقاومي، ستنصهر الوصلة وتقطع الدائرة الكهربائية. قواطع الدائرة الحديثة عبارة عن أجهزة كهرومغناطيسية تستخدم شريحة ثنائية المعدن. فإذا ارتفعت حرارة الشريحة بشكل كبير، تلتف الشريحة الثنائية المعدن، وفقاً لمعاملي التمدّد الحراري للمعدنين اللذين تتكون منهما الشريحة الثنائية المعدن، وتقطع الشريحة الملتفة الدائرة.

إن خط القدرة وقاطع الدائرة مصمَّمان بحيث يتعاملان مع شدة التيّار في الدائرة، الذي قد يصل إلى 30 A، على الرغم من أن معظم الأجهزة المنزلية تتطلب 15 A. المصابيح والأجهزة الأخرى مثل الميكروويف ومحامص الخبز تعمل على 120 V، إلا أن الطبّاخات الكهربائية ومجفِّفات الملابس تعمل على 240 V. وكل دائرة في المنزل لديها قاطع دائرة أو مِصهَر ملائم لمختلف الأحمال.

يتم توصيل الدائرة الكهربائية في المنازل على التوازي مع خطوط القدرة الكهربائية. ويتيح التوصيل على التوازي تشغيل وإطفاء أيّ جهاز كهربائي من دون التداخل مع عمل الأجهزة الكهربائية الأخرى . ولكن إذا استخدمنا التوصيل على التوالي، ستقطع الدائرة كلما أطفأنا أحد الأجهزة الكهربائية. ولهذا السبب يتم توصيل قواطع الدائرة على التوالي بين دائرة المنزل وخطوط القدرة؛ وقاطع الدائرة مصمّم لفصل الأجهزة الكهربائية في المنزل عن خطوط القدرة في حال حدوث حِمل زائد، مثل التغيُّر المفاجئ في الجهد أو التيار. وتظهر دائرة مفتوحة (Open Circuit) عندما تنقطع الدائرة المتصلة. وتظهر دائرة قِصَر (Short Circuit) عندما ينشأ مسار ذو مقاومة منخفضة للتيار.

الكهرباء يمكن أن تكون ضارة إذا لمس شخص السلك

المكهرب في أثناء ملامسته للأرض. والصدمات الكهربائية يمكن أن تُسبب حروقاً قد تكون قاتلة، كما يمكن أن تُحدِث خللاً في الأداء الروتيني للأعضاء الحيوية مثل القلب. ويعتمد حجم الضرر الحيوي على مدة ومقدار التيار الكهربائي. فالتيار الأعلى من 100 mA يمكن أن يكون قاتلاً إذا سرى في الجسم لبضع ثوانٍ.

يجب التعامل مع الأجهزة الكهربائية وخطوط القدرة بحذر. أسلاك الكهرباء ثلاثية الأطراف لمقابس التغذية 120 V مزوَّدة بطرفين متصلين بالأرضي وطرف واحد متصل بالسلك المكهرب. يتم توفير الطرفين الأرضيين للمزيد من الأمان في الأجهزة الكهربائية المصمَّمة بأسلاك ثلاثية الأطراف. أحد السلكين الأرضيين موصَّل إلى غطاء الجهاز ويوفر مساراً ذا مقاومة منخفضة للتيار إذا تم تقصير الدائرة بالسلك المكهرب.

6.2 التوليد الموزَّع للطاقة

تحدد الاعتبارات العملية حجم محطات الطاقة الكهربائية. معظم محطات الطاقة الكهربائية الكبرى لها قدرة قصوى تصل تقريباً إلى 1000 MW. وحجم محطة الطاقة الكهربائية محدد بحجم مكوّناتها، وبالمخاوف البيئية، وبمصدر الطاقة. على سبيل المثال، السرعة نصف القطرية لرأس توربين رياح كبير يمكن أن تقترب من السرعات فوق الصوتية. والمساحة التي تشغلها محطة الطاقة الكهربائية، والتي تسمى موطئ قدم المحطة، يمكن أن يكون لها أثر على استخدام الأرض المشغولة. محطات الطاقة التقليدية التي تحرق الوقود الأحفوري مثل الفحم الحجري أو الغاز الطبيعي يمكن أن تُنتج في حدود 1000 MW من القدرة الكهربائية. ومحطات الطاقة التي تعتمد على المفاعلات النووية تنتج أيضاً في حدود 1000 MW من القدرة

الكهربائية. وعلى العكس من ذلك، فإن محطات الطاقة الكهربائية التي تعتمد على الطاقة الشمسية في الوقت الحاضر يمكن أن تُنتج في حدود 10 MW من القدرة الكهربائية. والقدرة الكهربائية من مجموعة توربينات الرياح في محطات طاقة الرياح يمكن أن تتفاوت من 1 MW إلى مئات من الميغاوات. وإذا أردنا الاستمرار في الاعتماد على الطاقة النووية أو طاقة الوقود الأحفوري، يمكننا أن نتوقع محطات طاقة لتوليد ما يقارب 1000 MW من القدرة الكهربائية. وإذا أردنا التحوّل إلى محطات الطاقة الكهربائية التي تعتمد على الطاقة الشمسية أو طاقة الرياح، فإن القدرة الإنتاجية لكل محطة أقل من 1000 MW، ويجب علينا بالتالي توليد ونقل الطاقة الكهربائية من أكثر من محطة لتوفير الاحتياجات الحالية والمستقبلية من الطاقة الكهربائية.

في بعض المناطق يتزايد الضغط السكاني مما يوجب امتلاك محطات طاقة إضافية بقدرة إنتاجية أقل وتوزيع أوسع انتشاراً. الحكومة الفيدرالية للولايات المتحدة أقرّت قانوناً في عام 1978 سُمّي قانون السياسات المنظِّمة للخدمات العامة (PURPA) يسمح بموجبه للشركات غير الخدمية توليد ما يصل إلى MW 80 من القدرة الكهربائية ويُلزِم الشركات الخدمية شراء هذه القدرة الكهربائية. وقانون PURPA كان القانون الأول الذي تم إقراره خلال عقود وذلك لتخفيف الاحتكار على توليد الطاقة الكهربائية الذي احتفظت به الشركات الخدمية وإعادة تقديم المنافسة في قطاع توليد الطاقة الكهربائية لاقتصاد الولايات المتحدة.

إن التوليد الموزَّع للطاقة هو توليد الطاقة حيث يتم الاحتياج إليها وبالحجم الذي يناسب المستهلك[8]. من الأمثلة على الطاقة الموزَّعة تشمل نار المخيّم، والموقد الخشبي، والشمعة، والساعة التي تعمل بالبطارية، والسيارة. كلاً من هذه الأمثلة تولد الطاقة

الخاصة بها من أجل استخداماتها المحددة. تاريخياً، كان التوليد الموزَّع أول تقنية لتوليد الطاقة الكهربائية. توليد الطاقة الكهربائية وشبكة النقل التي ظهرت في القرن العشرين وما زالت قيد الاستخدام في الوقت الحاضر هي نظام مركزي يعتمد على محطات توليد الطاقة الكبرى وإمكانية النقل الواسع. وشبكة النقل توفر الطاقة الكهربائية للأماكن النائية.

يعتقد البعض أن مستقبل الطاقة يعتمد على حدوث نهضة في التوليد الموزَّع. ومن وجهة النظر هذه، فإن القليل من محطات الطاقة الكبرى في النظام المركزي ستُستبدل بعدد كبير من التقنيات الأصغر لتوليد الطاقة الكهربائية. يُعرِّف بوربيلي وكرايدر (Borbely and Kreider) التوليد الموزَّع بأنها «تقنيات توليد الطاقة الكهربائية الأقل من 10 MW من الخرج الكهربي والتي يمكن وضعها عند أو بالقرب من الأحمال التي تخدمها» (Borbely and Kreider, 2001). وهذا التعريف لا يشمل التقنيات الصغرى لتوليد الطاقة الكهربائية ذات المواقع المثالية المعتمِدة على مواقع مصدر طاقتها. على سبيل المثال، مولدات الطاقة الكهرومائية وطاقة الرياح لا تُعتبر من تقنيات التوليد الموزَّع وفقاً لتعريف بوربيلي وكرايدر لأن مولدات الطاقة الكهرومائية وطاقة الرياح تعتمد على توفر المياه المتدفقة والرياح، على التوالي. وبالتالي، فإن مولدات الطاقة الكهرومائية وطاقة الرياح يجب وضعها بالقرب من مصادر طاقتها، وهذه المواقع غالباً ليست قريبة من المستهلك للطاقة. سيتم مناقشة كلٍّ من هذه المولدات الكهربائية بالتفصيل في فصول لاحقة.

تعليقات ختامية

1 ـ المبادئ الأساسية لمكونات توليد وتوزيع الطاقة الكهربائية

مشروحة في العديد من الكتب الدراسية. على سبيل المثال، انظر (Serway and Faughn, 1985)، و(Cassedy and Grossman, 1998)، و(Young and Freedman, 2000).

2 ـ تاريخ توزيع الطاقة الكهربائية يعتمد بشكل أساسي على المعلومات المتوفرة في (Challoner, 1993)، و(Burke, 1985)، و(Aubrecht, 1995)، و(Brennan [et al.], 1996)، الفصل 2]، وبيرنال (Bernal, 1997)، الفصل 10].

3 ـ تحليل الدائرة *LCR* يتبع تقريباً التحليل المتوفر في هاليداي وريسنيك (Halliday and Resnick, 1981)، الفصلان 35 و36].

4 ـ نوقشت القدرة الكهربية في المراجع الواردة في القائمة الختامية رقم (1) وفي وايزر (Wiser, 2000)، و(Shepherd and Shepherd, 1998)، و(Brennan [et al.], 1996).

5 ـ تاريخ فائقية التوصيل مع استعراض لشدة المجال المغناطيسي العالي للمغناطيس الفائق التوصيل في (Van Sciver and Marken, 2002).

6 ـ (Scheinbein and Dagle, 2001)، و(Shepherd and Shepherd, 1998)، يناقشان النقل ثلاثي الطور.

7 ـ للمزيد من المناقشات عن الدوائر الكهربائية للمنازل، انظر (Serway and Faughn, 1985)، (Young and Freedman, 2000).

8 ـ للمزيد من المناقشات عن التوليد الموزَّع، انظر (Borbely and Kreider, 2001).

تمارين

1.2 أ) يتحرك إلكترون بسرعة نصف قطرية v_r في مسار دائري نصف قطره *1 m* بسبب تأثره بمجال مغناطيسي ثابت *B*. إذا وُضِع بروتون في نفس المجال المغناطيسي *B* وكانت سرعته نفس السرعة النصف قطرية v_r، فما هو نصف قطر المسار الدائري للبروتون؟

ب) هل يدور البروتون في نفس اتجاه دوران الإلكترون؟

ج) هل سيكون المسار دائري أم خطي لنيوترون يتحرك في المجال المغناطيسي؟

2.2 أ) افترض أن مقدار المجال الكهربي لموجة كهرومغناطيسية هو 300 V/m. احسب مقدار المجال المغناطيسي.

ب) احسب مقدار الطاقة لكل وحدة مساحة لكل وحدة زمن للموجة الكهرومغناطيسية، بمعنى آخر، احسب مقدار متجه بوينتنغ.

3.2 استنتج المعادلة (2.3.8) من المعادلة (2.3.7).

4.2 بيّن أن المعادلة (2.3.9) حل للمعادلة (2.3.8). ستحتاج إلى استخدام المعادلتين (2.3.10) و(2.3.11).

5.2 بيّن أن المعادلة (2.3.13) هي حل للمعادلة (2.3.8).

6.2 جذر متوسط مربع الجهد لمنزل في بريطانيا هو 240 V. ما مقدار جذر متوسط مربع التيار لمجفف شعر بمتوسط قدرة 1500 W؟ افترض أن معامل القدرة يساوي واحداً صحيحاً.

7.2 أ) وُصِّل منبع قدرة كهربائي 120 V إلى حِمل مقاومته 40 أوم. ما مقدار التيار في الحِمل؟

ب) ما مقدار القدرة التي يبددها الحِمل؟

8.2 أ) افترض أن مولد تيار متردد يُنتِج تياراً قدره 10 A عند جهد كهربي قدره 500 V. رُفِع الجهد الكهربي إلى 5000 V ونُقِل مسافة 1000 km خلال خط نقل مقاومته 0.03 أوم لكل كيلومتر من الخط. ما النسبة المئوية للقدرة المفقودة بواسطة خط النقل؟

ب) افترض أن مولد تيار متردد يُنتِج تياراً قدره 10 A عند جهد كهربي قدره 500 V. نُقِل الجهد الكهربي مسافة 1000 km خلال خط نقل مقاومته 0.03 أوم لكل كيلومتر من الخط. ما النسبة المئوية للقدرة المفقودة بواسطة خط النقل؟

ج) اشرح الفرق بين الجزئين (أ) و(ب).

9.2 أ) ما مقدار القوة الدافعة الكهربائية التأثرية القصوى في مولد تيار متردد بسيط عدد لفات ملفه 10 لفات ومساحته $0.1\ m^2$ ومقاومته 5 أوم؟ افترض أن الملف يدور في مجال مغناطيسي 0.5 T بتردد 60 Hz.

ب) ما مقدار التيار التأثري الأقصى ؟

10.2 أ) دائرة توالي *LCR* لديها الخصائص التالية: مقاومة 200 أوم، ومكثف 15 ميكروفاراد، ومِحَث 150 ميللي هنري، وتردد 60 هيرتز، وقوة دافعة كهربائية 80 فولت. احسب المفاعلة السعوية، والمفاعلة الحثية، والمفاعلة.

ب) احسب المعاوقة.

ج) احسب معامل القدرة وزاوية الطور ϕ.

11.2 أ) استخدم خصائص ونتائج التمرين (10.2) لحساب جذر متوسط مربع التيار والقوة الدافعة الكهربائية.

ب) احسب متوسط القدرة لدائرة التوالي *LCR* في التمرين (10.2).

ج) احسب التردد الرنيني لدائرة التوالي *LCR* في التمرين (10.2).

12.2 كم عدد الإلكترونات التي ستدخل جسمك إذا سرى تيار قدره 100 mA لمدة 30 ثانية خلال جسمك؟

13.2 ما مقدار متجه بوينتنغ لموجة كهرومغناطيسية شدة مجالها الكهربي 450 V/m؟ افترض أن الموجة الكهرومغناطيسية تنتشر في الفراغ.

14.2 احسب التيار المتولد بواسطة مغناطيس يدور حول ملف. يحتوي الملف على 100 لفة ومتصل بدائرة خارجية مقاومتها 50 أوم. وكل لفة مساحتها $0.01\ m^2$. ويدور المغناطيس بتردد زاوي $10\ sec^{-1}$ وشدة مجاله المغناطيسي يساوي 0.75 T.

15.2 أ) ما مقدار القدرة للدائرة الابتدائية في محول كهربائي إذا كان تيار وجهد الدائرة الابتدائية هما 12 A و400 V.

ب) افترض أن المحول يُستَخدم لرفع جهد الدائرة الابتدائية بحيث أن الجهد في الدائرة الثانوية هو 6000 V. ما مقدار التيار المصاحب للجهد الأكبر؟

ج) ما ميزة خفض التيار في خط النقل الكهربائي؟

الفصل الثالث

المحركات الحرارية والمبادِلات الحرارية

نشأ مفهوم الطاقة الحرارية، تاريخياً، من دراسة الاحتراق والتسخين[1]. رجل الدين والعالم الثري الإنجليزي جوزيف بريستلي (1733-1804) اعتقد أن الاحتراق يحدث نتيجة وجود عنصر يُسمّى اللاهوب (Phlogiston) في الهواء [وولف (Wolff)، 1967، الفصل 2]. والعالم الثري الحاصل على الزمالة الفرنسي أنطوان لافوازييه (Antoine Lavoisier) (1734-1794) عرّف اللاهوب بأنه عنصر الأكسجين [وولف، 1967، الفصل 3]. واليوم نحن نعرف بأن الأكسجين يُستهلك في أثناء عملية الاحتراق في الهواء. استخدم لافوازييه أيضاً مفهوم السَيّال الحراري (Caloric) لتفسير سلوك الجسم عند إخضاعه للتسخين والتبريد. والسيّال الحراري مادة غير مرئية و«غير قابلة للوزن بدقة» أو عديمة الوزن. وقال لافوازييه بأن الجسم الذي تم تسخينه تمدد عندما ملأ السيّال الحراري الفراغات الموجودة بين جُسَيمات الجسم. وعلى العكس من ذلك، انكمش الجسم عندما تم تبريده لأنه فقد السيّال الحراري. ومفهوم السيّال الحراري في النهاية استُبدِل بمفهوم الحرارة.

قدّم الأميركي بنيامين تومبسون (Benjamin (1753-1814)

(Thompson الذي أصبح الكونت رومفورد لمقاطعة بفاريا (Count Rumford of Bavaria) دليلاً تجريبياً على أن الحرارة ليست مادة محفوظة. وبحلول القرن التاسع عشر، أدرك عدد من الباحثين بشكل مستقل أن الحرارة أحد أشكال الطاقة وأن الطاقة محفوظة [هاليداي وريسنيك (Halliday and Resnick)، 1981، الفصل 20]. من المؤيدين الأوائل لمفهوم حفظ الطاقة هما الألمانيان خوليوس ماير (Julius Mayer) (1878-1814) وهيرمان لودفيغ فون هيلمهولتز (Hermann Ludwig Von Helmholtz) (1894-1821)، وجيمس جول (James Joule) (1889-1818) في إنجلترا، وكولدنغ (Colding) (1888-1815) في الدنمارك. عرض وولف [1965، الفصل 8] نسخة إنجليزية من ورقة بحث هيلمهولتز الفاصلة لمسألة حفظ الطاقة. ومجموعة المفاهيم عن الحرارة وحفظ الطاقة مع مفهوم الذرات للإنجليزي جون دالتون (John Dalton) (1844-1776) [وولف 1967، الفصل 4] أدت في نهاية المطاف إلى النظرية الحركية للذرات. وتربط النظرية الحركية درجة حرارة الجسم بحركة الذرات في الجسم. ووفقاً للنظرية الحركية، فإن أيّ جسم يتم تسخينه يتمدد لأن التسخين يزيد من طاقة حركة ذراته. وبالمثل، فإن أي جسم يتم تبريده ينكمش لأن التبريد يؤدي إلى خفض طاقة حركة الذرات في الجسم. فكرتا اللاهوب والسيّال الحراري كانتا أصل النماذج الأخرى ، أو كانتا اعتقادين تم التمسك بهما على نحو واسع في القرنين السابع عشر والثامن عشر. هذان النموذجان استُبدِلا في النهاية بالنظرية الحركية في القرن التاسع عشر[2].

إن الديناميكا الحرارية هي الدراسة التي تهتم بتدفق الطاقة الحرارية. وتتطلب التطبيقات العملية للطاقة معرفة قوانين الديناميكا الحرارية[3]. سنبدأ بتعريف المفاهيم الأساسية ومن ثم بوصف ما نعنيه

بالنظام الديناميكي الحراري. يلي هذا الوصف ملخص لقوانين الديناميكا الحرارية ومقدمة للاتزان الديناميكي الحراري. سنختتم هذا الفصل بمناقشة عن المحركات الحرارية، وطرق انتقال الحرارة، والمبادلات الحرارية.

1.3 درجة الحرارة والتركيب

إن درجة الحرارة هي مقياس لمتوسط طاقة حركة النظام. ويقدم لنا التركيب معلومات كمية عن مركبات أو مكونات المادة. ودرجة الحرارة والتركيب معاً، هما اثنان من أهم المفاهيم الأساسية في الديناميكا الحرارية. وهما مُعرَّفان في القسمين الآتيين لسهولة الإشارة.

درجة الحرارة

من مقاييس درجة الحرارة المستخدمين بشكل شائع هما مقياسا الفهرنهايت (Fahrenheit) والسلسيوس (Celsius) (أو المئوي). والعلاقة بين هذين المقياسين هو:

$$T_C = \frac{5}{9}(T_F - 32) \tag{3.1.1}$$

حيث T_C وT_F درجتا الحرارة بالدرجة المئوية (°C) والدرجة الفهرنهايتية (°F) على التوالي.

يتم الاحتياج إلى درجة الحرارة المطلقة في العديد من التطبيقات، مثل معادلات الحالة التي سنناقشها في الفقرات التالية. ويتم التعبير عن درجة الحرارة المطلقة عادة بدلالة الكلفن (Kelvin) أو الرانكين (Rankine). ومقياس درجة الحرارة المطلقة بالكلفن مرتبط بمقياس السلسيوس بالعلاقة التالية:

$$T_K = T_C + 273 \tag{3.1.2}$$

حيث T_K درجة الحرارة بالكلفن ويُرمز لها بالرمز K [تكتب K من دون إشارة الدرجة «°»]. والكلفن هو المقياس الأساسي لدرجة الحرارة في نظام الوحدات SI، والصفر على مقياس الكلفن يُسمّى الصفر المطلق (Absolute Zero). ومقياس درجة الحرارة المطلقة بالرانكين مرتبط بمقياس الفهرنهايت بالعلاقة التالية:

$$T_R = T_F + 460 \tag{3.1.3}$$

حيث T_R درجة الحرارة بالرانكين ويُرمز لها بالرمز R [أيضاً تكتب R من دون إشارة الدرجة «°»]. ويُستخدَم مقياس الرانكين في العديد من التطبيقات الهندسية.

تركيب المائع

إن مكوِّنات المادة هي التي تحدد تركيب المادة. والمقدار النسبي لكل مكوِّن في الجسم يُعرَّف بتركيز المكوِّن. ويمكن التعبير عن التركيز بوحدات مثل الحجم الكسري، أو الوزن الكسري، أو الجزيئي الجرامي الكسري. ووحدة التركيز يجب التعبير عنها بوضوح لتفادي الأخطاء. ويُعبَّر عن التركيز، غالباً، بالجُزَيء الجرامي الكسري (المول الكسري) (Mole Fraction). والجُزَيء الجرامي (المول) (Mole) هو الوحدة الأساسية لكمية المادة في نظام الوحدات SI. وواحد مول من مركب جزيئي يحتوي على عدد أفوغادرو من الجُزَيئات. على سبيل المثال، واحد مول من الكربون بكتلة ذرية 12 له كتلة مقدارها (12 g) 0.012 kg، وواحد مول من ثاني أكسيد الكربون بكتلة ذرية 44 له كتلة مقدارها (44 g) 0.044 kg. المول الكسري y_i للمكوِّن i في خليط غازي هو عدد المولات n_i لهذا المكوِّن في الغاز مقسوماً على العدد الكلي للمولات في الغاز، أي إن:

$$y_i = \frac{n_i}{\sum_{j=1}^{N_c} n_j} \quad (3.1.4)$$

حيث N_c عدد المكوِّنات في الخليط الغازي. الوزن الجزيئي الظاهري M_a للخليط الغازي هو:

$$M_a = \sum_{j=1}^{N_c} y_j M_j \quad (3.1.5)$$

حيث M_j الوزن الجزيئي للمكوِّن j. الوزن النوعي γ_g للخليط الغازي هو الوزن الجزيئي الظاهري للخليط الغازي مقسوماً على الوزن الجزيئي للهواء، أي إن:

$$\gamma_g = \frac{M_a(\text{غاز})}{M(\text{هواء})} \approx \frac{M_a(\text{غاز})}{29} \quad (3.1.6)$$

على الرغم من اهتمامنا بجميع الحالات الفيزيائية للمادة، فإنه من الجدير أن نطوّر مفهوم التركيب للموائع ببعض من التفاصيل. تؤدّي الموائع دوراً هاماً في المجتمع كمصدر سائد للطاقة: البترول. والبترول هو خليط من جُزَيئات الهيدروكربون، أي إن الجُزَيئات تتكون أساساً من الهيدروجين والكربون. أنواع الذرات أو الجُزَيئات التي تشكِّل المائع تحدد تركيب المائع. وكل نوع يشار إليه كمكوِّن. المائع يمكن أن يوجد إما كغاز أو كسائل. والمائع النقي يحتوي على نوع واحد من الجُزَيئات ، مثل الماء أو الميثان. وخليط المائع يحتوي على عدة أنواع من الجُزَيئات . مثلاً، يحتوي الماء في الصخور عادة على مواد صلبة مذابة وقد يحتوي على غازات مذابة. ويمكننا أن نحدد تركيب المائع بجدولة المكوِّنات الجُزَيئية المحتواة في المائع ومقاديرها النسبية.

مقدار المكوِّن i في الطور الغازي بالنسبة إلى طور السيولة

يمكن التعبير عنه بالقيمة K الاتزانية، التي هي النسبة:

$$K_i = \frac{y_i}{x_i} \qquad (3.1.7)$$

حيث y_i المول الكسري للطور الغازي وx_i المول الكسري لطور السيولة. والمول الكسري لطور السيولة هو عدد المولات n_i للمكوّن في السائل مقسوماً على العدد الكلي للمولات في السائل، أي إن:

$$x_i = \frac{n_i}{\sum_{j=1}^{N_c} n_j} \qquad (3.1.8)$$

المدى المسموح للقيمة K الاتزانية يتم تحديده بافتراض حالتين خاصتين. إذا كان المكوّن i موجود بالكامل في طور السيولة، فإن المول الكسري للطور الغازي y_i يساوي 0 وK_i تساوي 0. وعلى العكس من ذلك، إذا كان المكوّن i موجوداً بالكامل في الطور الغازي، فإن المول الكسري لطور السيولة x_i يساوي 0 وK_i تقترب من اللانهاية. وبهذا، فإن القيمة K الاتزانية للمكوّن i يمكن أن تتفاوت من 0 إلى ما لا نهاية. ويمكن حساب القيمة K الاتزانية لكل مكوّن جزيئي محدد في المائع.

2.3 الأنظمة والحالات الديناميكية الحرارية

إن «النظام» هو جزء من الكون الذي نتأمله. وكل شيء خارج النظام يُسمّى «الوسط المحيط». كمثال، افترض أننا نُسقط مكعباً من الثلج في كأس به ما، يمكننا أن نعتبر الثلج كنظام والماء كوسط محيط. هذا المثال يوضح أن الوسط المحيط لا يكون، بالضرورة، محيطاً بالنظام.

والنظام المعزول (Isolated System) لا يتفاعل مع الوسط المحيط به. والنظام المغلق (Closed System) يمكن أن يتبادل الطاقة

مع الوسط المحيط به، ولكنه لا يتبادل المادة. بمعنى آخر، يمكن للطاقة أن تتدفق بين النظام المغلق والوسط المحيط به، ولكن لا تتدفق أيّ مادة بين النظام المغلق والوسط المحيط به. وعلى العكس من ذلك، فإن الطاقة والمادة يمكن أن تتدفقا بين النظام المفتوح (Open System) والوسط المحيط به.

إن «حالة» النظام هي مجموعة المتغيرات الديناميكية الحرارية التي تصف النظام. ومن المتغيرات النموذجية للحالة تشمل الضغط P، والحجم V، ودرجة الحرارة T. والعملية (Process) هي تحوّل من حالة واحدة للنظام إلى حالة أخرى . في مثالنا أعلاه، أسقطنا مكعباً من الثلج في كأس به ماء. مع بدء ذوبان الثلج، بعض جزيئات الماء التي بدأت في حالة صلبة كثلج تكتسب طاقة حركة وقد تدخل الحالة السائلة. إذا عرّفنا النظام ليكون الثلج، فإن العملية الديناميكية الحرارية هي ذوبان الثلج. وإذا عرّفنا النظام ليكون الماء السائل، فإن العملية الديناميكية الحرارية هي برودة الماء. وفي كلتا الحالتين، فإن النظام هو نظام مفتوح لأن كلاً من المادة والطاقة يمكن أن يتدفقا بين النظام المفتوح والوسط المحيط به.

تُعتبر العملية عكوسة (Reversible) إذا تغيّر النظام من حالته الابتدائية إلى حالته النهائية بالمرور خلال سلسلة مستمرة من حالات الاتزان. وحالة الاتزان (Equilibrium) هي حالة النظام المغلق الذي يمكن الحصول عليه عندما لم تعد متغيرات الحالة تتغير مع الزمن. وحالة النظام يمكن جعلها تعكس مسارها في أيّ مرحلة من العملية العكوسة وتعود إلى حالتها الابتدائية. وإذا كانت الحالات المتخللة ليست حالات اتزان، فإن العملية تكون لاعكوسة (Irreversible) والعودة إلى الحالة الابتدائية للنظام من الحالة النهائية لا يمكن إحداثها من خلال عكس مسار العملية. جميع العمليات الحقيقية

لاعكوسة، ولكن في بعض الحالات من الممكن أن تقترب من العملية العكوسة.

لنفترض أننا قسمنا خلية من الغاز إلى نصفين بإدراج حاجز عمودي. يعتبر التقسيم عكوساً إذا كانت درجة حرارة الحاجز مساوية لدرجة حرارة الغاز في الخلية وكان حجم الحاجز مهملاً. لأن أيّ حاجز حقيقي سيكون له حجم محدد، فقد اخترنا الحاجز ليكون صغيراً بالنسبة إلى حجم الخلية بحيث يمكننا إهمال حجم الحاجز ونستطيع العمل بعملية عكوسة تقريباً. إذا كان الغاز مبدئياً في حالة اتزان، فإن الغاز في كل قسم من الخلية بعد إدراج الحاجز يجب أن يكون له نفس الضغط ودرجة الحرارة كما كان عليه قبل إدراج الحاجز. الكتلة والحجم في كل قسم من الخلية سيصبحان نصف الكتلة والحجم الأصليين، ولكن نسبتيهما، أي الكثافة، لا تتغيران. الكتلة والحجم مثالان على الخصائص الشاملة. والخاصية الشاملة (Extensive Property) هي خاصية النظام التي تعتمد على كمية المادة. الكثافة، ودرجة الحرارة، والضغط من الأمثلة على الخصائص المركزة. والخاصية المركزة (Intensive Property) هي خاصية النظام التي لا تعتمد على كمية المادة.

معادلات الحالة

تُستخدم معادلة الحالة لتحديد العلاقة بين حالة المتغيرات. قانون الغاز المثالي يربط بين P، وV، وT لغاز مثالي من خلال علاقة الحالة التالية:

$$PV = nRT \tag{3.2.1}$$

حيث R ثابت الغاز العام وn عدد المولات للغاز. ويعتبر الغاز «مثالياً» إذا كان الغاز يتكوّن من جُسَيمات غير متفاعلة. ويمكن

حساب درجة المثالية لغاز باستخدام العلاقة اللابُعدية التالية لمعامل انضغاطية الغاز:

$$Z = \frac{PV}{RT} \tag{3.2.2}$$

وذلك لمول واحد من الغاز (n = 1 mole). وفي حالة الغاز المثالي، فإن معامل انضغاطية الغاز تُحقق $Z = 1$. وإذا سمحنا للتفاعلات أن تحدث بين الجُسَيمات، يجب عندئذ تعديل قانون الغاز المثالي. وأحد هذه التعديلات هو قانون الغاز الحقيقي التالي:

$$PV = ZnRT \tag{3.2.3}$$

معامل انضغاطية الغاز Z لا يساوي الواحد الصحيح للغاز الحقيقي. ويمكن تكوين معادلات حالة أخرى تتضمن مجموعة من المعاملات القابلة للتعديل $\{a,b\}$ والتي يمكن أن تكون دوال (جمع دالة) في درجة الحرارة والتركيب. فان درفال (J. D. Van Der Waals) أدخل المعامل b في عام 1867 ليفسر الحجم المحدَّد للذرة أوالجُزَيء.

يبيّن الجدول (1.3) بعض معادلات الحالة لمول واحد من مائع. معاملات مفكوك معدّل الطاقة (Virial Expansion) في الجدول (1.3) تسمى معاملات «معدل الطاقة»: $B(T)$ هو معامل معدل الطاقة الثاني؛ و$C(T)$ هو معامل معدل الطاقة الثالث؛ وهكذا [بومان (Baumann)، 1992، ص 135]. ومعادلات الحالة ريدليش ـ كوونغ (Redlich-Kwong)، وسوافي ـ ريدليش ـ كوونغ (Soave-Redlich-Kwong)، وبينغ ـ روبنسون (Peng-Robinson)، وزودكيفيتش ـ جوفي (Zudkevitch-Joffe) في الجدول (1.3) تسمى «تكعيبية» لأنها تعطي معادلة تكعيبية لمعامل الانضغاطية Z. والحد الأول في معادلة الحالة لفان درفال يظهر في كلٍّ من معادلات الحالة التكعيبية.

ومعامل الحجم b يعتمد على درجة الحرارة في معادلة الحالة لزودكيفيتش - جوفي. من المفيد غالباً مطابقة بيانات أكثر من معادلة حالة لأن معادلات الحالة تختلف في قدرتها على أن تتطابق مع مختلف أنواع القياسات ومختلف أنواع الموائع.

تُستخدم معادلات الحالة في عدد من المجالات الدراسية، مثل الهندسة الكيميائية وهندسة المكامن. ومعاملات معادلة الحالة مثل المعاملات $\{a,b\}$ في الجدول (1.3) يجب تعيينها قبل استخدام معادلة الحالة كنموذج كمي لخصائص المائع. للخليط الذي يحتوي على عدد N_c من المكوِّنات، فإن المعاملات $\{a,b\}$ لديها الصورة التالية:

$$a=\sum_{i=1}^{N_c}\sum_{j=1}^{N_c}a_i a_j x_i x_j(1-\delta_{ij}),$$
$$b=\sum_{i=1}^{N_c}b_i x_i \qquad (3.2.4)$$

حيث $\{a_i,b_i\}$ تشير إلى قيم معادلة الحالة للمكوِّن i بالمول الكسري x_i، وδ_{ij} صف متماثل من الأعداد تسمى معاملات التفاعل الزوجي. ويتم تعيين معاملات التفاعل الزوجي بمطابقة معادلات الحالة إلى قياسات خاصية المائع لخليط من المكونات الزوجية. ويفترض أن التفاعل بين المكوِّنات الزوجية في خليط به مكوِّنات أخرى سيكون هو نفسه كما لو أن هناك زوجاً من المكونات فقط. عملياً، هذه الفرضية لينة ويتم تعيين معاملات التفاعل الزوجي للخليط بمطابقة معادلة الحالة للخليط إلى القياسات المعملية لخصائص الخليط، مثل التغير في الحجم الناتج عن التغير في الضغط.

الجدول (1.3)

أمثلة على معادلات الحالة لمول واحد من المائع

الاسم	معادلة الحالة
فان درفال	$P=\frac{RT}{V-b}-\frac{a}{V^2}$
معاملات مفكوك معدّل الطاقة	$P=\frac{RT}{V}\left[1+B(T)V^{-1}+C(T)V^{-2}+...\right]$
ريدليش ـ كوونغ	$P=\frac{RT}{V-b}-\frac{a/T^{1/2}}{V(V+b)}$
سوافي ـ ريدليش ـ كوونغ	$P=\frac{RT}{V-b}-\frac{a(T)}{V(V+b)}$
بينغ ـ روبنسون	$P=\frac{RT}{V-b}-\frac{a(T)}{V(V+b)+b(V-b)}$
زودكيفيتش ـ جوفي	$P=\frac{RT}{V-b(T)}-\frac{a(T)/T^{1/2}}{V[V+b(T)]}$

هناك العديد من تقنيات الانكفاء المستخدمة لمطابقة معاملات معادلة الحالة إلى البيانات المعملية. وتختلف هذه التقنيات عادة في اختيار المعاملات التي سيتم تغييرها في محاولة لمطابقة البيانات المعملية مع معادلة الحالة. وتعديل معاملات معادلة الحالة يُسمّى «ضبط» معادلة الحالة. وأحد مبررات ضبط معادلة الحالة هو أن المعاملات يتم تعيينها للأنظمة التي بمكوّن واحد أو مكوّنين فقط، إلا أن العديد من الموائع ذات الاهتمام هي بشكل عام خليط بالعديد من المكوّنات. والتعديلات في معاملات معادلة الحالة هي محاولة لمطابقة خاصية المكوّنات المتعددة لنظام المائع.

3.3 قوانين الديناميكا الحرارية

لقد تمت صياغة قوانين الديناميكا الحرارية أساساً لمحاولة

معرفة المشاهدات. وهي بهذا مبنية على التجارب المعملية. سنبدأ بافتراض ثلاث أنظمة A، B، C بدرجات حرارة T_A، T_B، T_C. إذا كان اثنان من هذه الأنظمة في اتزان ديناميكي حراري مع النظام الثالث، فإنهما بالتالي يجب أن يكونا في اتزان ديناميكي حراري مع بعضهما بعضاً. هذه المشاهدة هي القانون الصِفري للديناميكا الحرارية. ويمكن كتابة القانون الصِفري للديناميكا الحرارية كما يلي:

(3.3.1) إذا كان $T_A = T_C$ و$T_B = T_C$ فإن $T_A = T_B$

يعرّف القانون الأول للديناميكا الحرارية الحرارة بأنها أحد أشكال الطاقة وأن الطاقة اللانسبية محفوظة. ويمكن كتابة القانون الأول للديناميكا الحرارية على النحو التالي:

$$dU = dQ - dW \qquad (3.3.2)$$

حيث:

dU = التغيّر في الطاقة الداخلية للنظام

dQ = الطاقة المكتسبة بواسطة النظام

dW = الشغل المبذول بواسطة النظام على الوسط المحيط به

القانون الثاني للديناميكا الحرارية هو بيان عن العشوائية في النظام المغلق. ويؤكد بأن العشوائية في النظام ستبقى ثابتة أو ستزداد، ويقيس ذلك باستخدام مفهوم الإنتروبيا (Entropy). ويمكن التعبير عن أيّ تغيّر بسيط جداً في الإنتروبيا dS بأنه النسبة بين كمية الحرارة البسيطة جداً المكتسبة بواسطة النظام dQ إلى درجة حرارة النظام T، أي إن:

$$dS = \frac{dQ}{T} \qquad (3.3.3)$$

وينص القانون الثاني للديناميكا الحرارية على أن التغيّر في الإنتروبيا ΔS يجب أن يزداد أو يبقى ثابتاً، وبهذا فإن:

$$\Delta S \geq 0 \qquad (3.3.4)$$

القانون الثالث للديناميكا الحرارية هو إفادة عن سلوك النظام عند اقتراب درجة حرارته من الصفر المطلق. وينص القانون الثالث للديناميكا الحرارية على أن إنتروبيا النظام تقترب من قيمة ثابتة S_0 مع اقتراب درجة حرارة النظام من الصفر المطلق. ويمكن كتابة القانون الثالث للديناميكا الحرارية بالشكل التالي:

$$\text{عندما } T \rightarrow 0_+\text{K} \quad \text{فإن } S \rightarrow S_0 \qquad (3.3.5)$$

يمكن اعتبار القانون الثالث للديناميكا الحرارية نتيجة طبيعية للقانون الثاني.

السعة الحرارية

إن السعة الحرارية C (Heat Capacity) هي كمية الحرارة ΔQ اللازمة لرفع درجة حرارة جسم بمقدار طفيف ΔT أي إن:

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \qquad (3.3.6)$$

السعة الحرارية النوعية C (Specific Heat Capacity) (أو الحرارة النوعية) هي السعة الحرارية مقسومة على كتلة الجسم m، أي إن:

$$c = \frac{1}{m}\frac{\Delta Q}{\Delta T} \qquad (3.3.7)$$

إذا دمجنا المعادلتين (3.3.7) و(3.3.3) سنحصل على تعبير للإنتروبيا بدلالة الحرارة النوعية كالتالي:

$$dS = \frac{dQ}{T} = \frac{mcdT}{T} \qquad (3.3.8)$$

كمية الحرارة Q المكتسبة بواسطة المادة يمكن أن تُغيّر من الحالة الفيزيائية للمادة، أو الطور. كمية الحرارة اللازمة لتغيير الطور لجسم كتلته m هي:

$$Q = \pm mL \tag{3.3.9}$$

حيث L كمية الحرارة اللازمة لتغيّر الطور. الكمية L هي حرارة الانصهار لتغيّر الطور من الصلب إلى السائل؛ وL هي حرارة التبخير لتغيّر الطور من السائل إلى الغاز؛ وL هي حرارة التسامي لتغيّر الطور من الغاز إلى الصلب. وإشارة الحرارة Q تعتمد على اتجاه تغيّر الطور. الزيادة في الحرارة المكتسبة بواسطة المادة تعني أن $Q > 0$، مثل ذوبان المادة، والنقصان في المحتوى الحراري يعني أن $Q < 0$، مثل تجمد المادة. المعادلة (3.3.9) صالحة أيضاً للتغيّر في الحالة الفيزيائية للمادة والذي يحدث نتيجة تفاعل كيميائي. على سبيل المثال، إذا كان التفاعل الكيميائي هو احتراق، فإن الكمية L هي حرارة الاحتراق.

تعتمد السعة الحرارية على متغيرات الحالة. إذا عرّفنا M بأنها الكتلة لكل مول، فإن السعة الحرارية المولارية (Molar Heat Capacity) عند ثبوت الحجم C_V هي حاصل ضرب M في الحرارة النوعية عند ثبوت الحجم c_V، أي إن $C_V = Mc_V$. بالمثل، يمكن تعريف السعة الحرارية المولارية عند ثبوت الضغط على النحو $C_P = Mc_P$. والسعة الحرارية المولارية عند ثبوت الحجم مرتبطة بالسعة الحرارية المولارية عند ثبوت الضغط للغاز المثالي بالعلاقة التالية:

$$C_P = C_V + R \tag{3.3.10}$$

حيث R ثابت الغاز العام. والنسبة بين السعتين الحراريتين للغاز المثالي هي:

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V} = \frac{c_P}{c_V} \quad (3.3.11)$$

القيم النموذجية للنسبة بين السعتين الحراريتين γ تتفاوت من 1.3 إلى 1.7.

القيمة التسخينية

يمكن حساب القيمة التسخينية (Heating Value) للغاز من تركيب الغاز والقيمة التسخينية المصاحبة لكل مكوّن للغاز. ويمكن تعريف القيمة التسخينية للخليط H_m على النحو التالي:

$$H_\mathrm{m} = \sum_{i=1}^{N_c} y_i H_i \quad (3.3.12)$$

حيث N_c عدد المكوّنات، وy_i المول الكسري للمكوّن i، وH_i القيمة التسخينية للمكوّن i. والقيمة التسخينية للغاز الطبيعي النموذجي تتفاوت بين $1000\ \mathrm{BTU/ft^3}$ $(3.73 \times 10^7\ \mathrm{J/m^3})$ إلى $1200\ \mathrm{BTU/ft^3}$ $(4.48 \times 10^7\ \mathrm{J/m^3})$ عند الظروف المعيارية (أي عند درجة الحرارة والضغط المعياريتين). القيم التسخينية للمكوّنات الجزيئية في الخليط مجدولة في الكتب المرجعية.

4.3 شروط الاتزان في غياب الجاذبية

سنوضح مبادئ الديناميكا الحرارية المقدَّمة في القسم السابق من خلال استخدامها لتعيين شروط الاتزان الديناميكي الحراري لخليط من المائع في نظام مفتوح. سنبدأ عملية الحساب بافتراض أن الخليط مُحتوَى في نظام مغلق. هذه الفرضية المبسطة ستتيح لنا تعريف طاقة جيبس (Gibbs) الحرة. سنقوم بعد ذلك بحل مسألة أكثر عمومية للنظام المفتوح.

النظام المغلق

قمنا في القسم 3.3 بكتابة القانون الأول للديناميكا الحرارية لنظام مغلق على النحو التالي:

$$dU = dQ - dW \tag{3.4.1}$$

حيث:

dU = التغيّر في الطاقة الداخلية للنظام

dQ = الطاقة المكتسبة بواسطة النظام

dW = الشغل المبذول بواسطة النظام على الوسط المحيط به

وللعملية العكوسة المتناهية في الصغر، لدينا:

$$dQ = T\,dS \tag{3.4.2}$$

حيث S = إنتروبيا النظام.

لنفترض أن النظام متصل حرارياً بحمام حراري ثابت الحجم، عند درجة حرارة ثابتة ومنتظمة T. إذا كان الشغل المبذول بواسطة النظام هو فقط نتيجة التمدد أو الانضغاط، فإن:

$$dW = P\,dV \tag{3.4.3}$$

حيث V حجم النظام وP ضغط ثابت ومنتظم مطبَّق على النظام. بتعويض المعادلتين (3.4.2) و(3.4.3) في المعادلة (3.4.1) نحصل على:

$$dU = T\,dS - P\,dV \tag{3.4.4}$$

الاعتماد الدالّي للطاقة الداخلية U على المتغيرات الديناميكية الحرارية المستقلة هي:

$$U = U(S,V) \quad (3.4.5)$$

وهناك كمية ديناميكية حرارية أخرى مفيدة هي طاقة جيبس الحرة. وتسمى طاقة جيبس الحرة أيضاً بالجهد الديناميكي الحراري، وتعطى بالعلاقة التالية:

$$G = U - TS + PV \quad (3.4.6)$$

والاعتماد الدالّي لطاقة جيبس الحرة G على المتغيرات الديناميكية الحرارية المستقلة هي:

$$G = G(T,P) \quad (3.4.7)$$

وتفاضل طاقة جيبس الحرة يمكن إيجاده بأخذ تفاضل المعادلة (3.4.6) الخاضعة للاعتماد الدالّي المحدد في المعادلة (3.4.7)، أي إن:

$$dG = -S\,dT + V\,dP \quad (3.4.8)$$

ونستخدم طاقة جيبس الحرة لتكوين معايير من أجل تحقيق اتزان الطور.

النظام المفتوح

لخليط من المائع الأحادي الطور في النظام المفتوح، فإن الدالتين الديناميكيتين الحراريتين U وG تعتمدان أيضاً على مقدار كل مكوِّن:

$$U = U\left(S,V,n_1,n_2,\ldots,n_{N_C}\right) \quad (3.4.9)$$

$$G = G\left(T,P,n_1,n_2,\ldots,n_{N_C}\right) \quad (3.4.10)$$

لعدد N_c من المكوِّنات. عدد المولات للمكوِّن i هو n_i.

والصيغة التفاضلية لكل من U وG هي:

$$dU = T\,dS - P\,dV + \sum_{i=1}^{N_c} \mu_i dn_i \qquad (3.4.11)$$

$$dG = -S\,dT + V\,dP + \sum_{i=1}^{N_c} \mu_i dn_i \qquad (3.4.12)$$

حيث يُعرَّف الجهد الكيميائي μ_i على النحو التالي:

$$\mu_i = \left(\frac{\partial U}{\partial n_i}\right)_{S,V,n_j} = \left(\frac{\partial G}{\partial n_i}\right)_{T,P,n_j} \qquad (3.4.13)$$

الجهد الكيميائي هو التغير في طاقة جيبس الحرة بالنسبة إلى عدد المولات للمكوِّن. ويفسر الجهد الكيميائي حركة الكتلة إلى داخل أو من خارج النظام المفتوح.

الاتزان والقانون الثاني للديناميكا الحرارية

القانون الثاني للديناميكا الحرارية ينص على أن جميع العمليات الحقيقية في النظام المعزول تحدث مع تغيّر في الإنتروبيا مقداره صفر أو موجب، أي إن:

$$dS > 0 : \text{لاعكوسة}$$
$$dS = 0 : \text{عكوسة} \qquad (3.4.14)$$

جميع العمليات الحقيقية لاعكوسة، ولكن إذا كانت التغيرات من حالة اتزان إلى حالة اتزان أخرى صغيرة بما فيه الكفاية، فإنه يمكن معاملة العملية الحقيقية كعملية عكوسة مثالية.

الجدول (2.3) شروط الاتزان

المتغير	الحد	خاضع لثبوت المتغيرات
S	الأقصى	U، V، n_i لجميع قيم i
U	الأدنى	S، V، n_i لجميع قيم i
G	الأدنى	T، P، n_i لجميع قيم i

يصل النظام المعزول إلى حالة الاتزان عند رفع الإنتروبيا إلى أقصى حد، أي عندما تحقق الإنتروبيا العلاقة التالية:

$$dS = 0 \qquad (3.4.15)$$

وهذا خاضع للشروط بأن تكون U، V، $\{n_i\}$ ثابتة، أي إن:

$$\begin{aligned} dU &= 0 \\ dV &= 0 \\ dn_i &= 0 \quad \forall i = 1,\dots,N_c \end{aligned} \qquad (3.4.16)$$

كما يمكن تحديد شروط الاتزان للكميات الديناميكية الحرارية U وG إذا خُفضت U وG إلى أدنى حد. يلخص الجدول (2.3) شروط الاتزان.

5.3 المحركات الحرارية

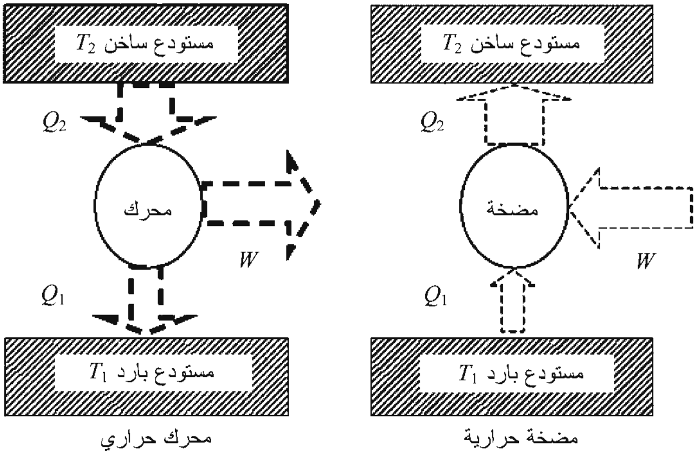
إن «المحرّك الحراري» هو جهاز يحوّل الحرارة إلى أحد أشكال الطاقة الأخرى ، مثل الطاقة الميكانيكية أو الطاقة الكهربائية. وللمقارنة، فإن «المضخة الحرارية» هي جهاز لنقل الحرارة من موقع إلى آخر. يمثل الشكل (1.3) رسماً توضيحياً للمحرك الحراري والمضخة الحرارية. في المحرك الحراري، يقوم المحرك بتحويل الحرارة Q_2 الخارجة من المستودع الساخن إلى شغل W وطرد الحرارة Q_1 إلى المستودع البارد. المضخة الحرارية، من جهة أخرى ، تقوم بدمج الحرارة Q_1 الخارجة من المستودع البارد مع الشغل W لنقل حرارة Q_2 إلى المستودع الساخن. الكفاءة الحرارية للمحرك الحراري هي النسبة بين صافي الشغل المبذول إلى كمية الحرارة المكتسبة، وتكتب على الصورة التالية:

$$\eta = \frac{W}{Q_2} = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2} = 1 - \frac{Q_1}{Q_2} \qquad (3.5.1)$$

ومعامل الأداء للمضخّة الحرارية هو النسبة بين كمية الحرارة

المنقولة إلى الشغل المبذول بواسطة المضخة، أي إن:

$$\text{COP} = \frac{Q_2}{W} \qquad (3.5.2)$$



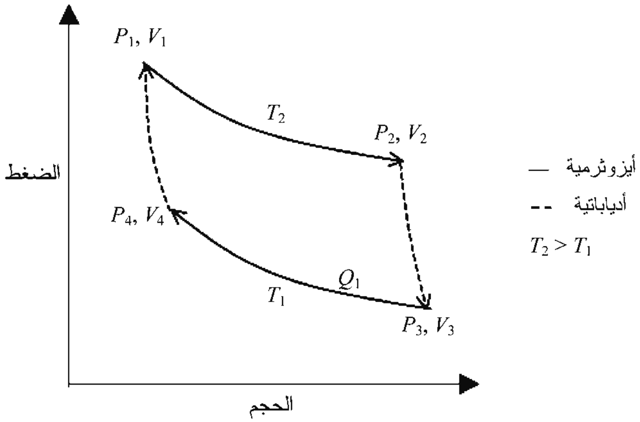
الشكل (1.3): المحرك الحراري والمضخة الحرارية

دورة كارنو

قدّم الفرنسي سادي كارنو (Sadi Carnot) (1796-1832) نموذجاً نظرياً لمحرك حراري في عام 1824، واستخدم الغاز المثالي كمادة التشغيل. تم تمديد وضغط الغاز في أربع مراحل متتالية عكوسة. هذه المراحل مبيّنة في الجدول (3.3) وموضحة في الشكل (2.3). المرحلتان الأولى والثالثة هما عمليتان أيزوثرميتان، والمرحلتان الثانية والرابعة هما عمليتان أدياباتيان. العملية الأيزوثرمية (Isothermal Process) هي العملية التي لا تتغير فيها درجة الحرارة ـ أي إن درجة الحرارة تبقى ثابتة خلال العملية. والعملية الأدياباتية (Adiabatic Process) هي العملية التي لا يكون فيها تبادل حراري ـ أي لا تدخل أيّ حرارة إلى النظام أو تخرج أيّ حرارة منه.

الجدول (3.3) مراحل دورة كارنو

المرحلة	العملية
الأولى	تمدد أيزوثرمي عند درجة الحرارة العالية T_2
الثانية	تمدد أدياباتي
الثالثة	انضغاط أيزوثرمي عند درجة الحرارة المنخفضة T_1
الرابعة	انضغاط أدياباتي



الشكل (2.3): دورة كارنو

قمنا بتعريف كفاءة المحرك η في المعادلة (3.5.1) بدلالة الحرارة والشغل. وهناك تعريف آخر يقول إن كفاءة المحرك η هي النسبة بين الحرارة المحوَّلة إلى شغل إلى الحرارة الكلية المكتسبة، أي إن:

$$\eta = \frac{\text{الحرارة المحوّلة إلى الشغل}}{\text{الحرارة الكليّة المكتسبة}} = \frac{\text{الشغل الخارج}}{\text{الحرارة الداخلية}} \tag{3.5.3}$$

ومعامل الكفاءة لدورة كارنو هو:

$$\eta = \frac{T_2 - T_1}{T_2} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \tag{3.5.4}$$

إن بعض سمات دورة كارنو يصعب تنفيذها عمليّاً [سينجل وبولز (Çengel and Boles)، 2002، الفصل 9]. على سبيل المثال، إذا كان البخار هو مائع التشغيل، فإن تكوُّن قطرات سائلة (ماء) بالتكثيف يمكن أن تسبب تآكل أرياش التوربين لأن القطرات السائلة تقع على أرياش التوربين. لذلك من المرغوب الحفاظ على نوعية عالية من البخار. تأتي دورة رانكين (Rankine cycle) لتحل العديد من الصعوبات المرافقة لدورة كارنو.

تفترض دورة رانكين أنه يتم إعداد بخار ساخن جداً في غلاية ويحدث التكثيف الكامل له في مكثف. ويتم إحضار الماء إلى داخل النظام بواسطة الضغط الإنتروبي الثابت (أيزينتروبي (Isentropic)) في مضخّة. ويتم تحويل الماء إلى بخار ساخن جداً بإضافة حرارة عند ضغط ثابت في الغلاية. يخضع البخار الساخن جداً لتمدد أيزينتروبي في التوربين. يتم بعد ذلك رفض الحرارة الإضافية عند ثبوت الضغط في المكثف. ولا توجد عمليات لاعكوسة داخلية في دورة رانكين المثالية. لمزيد من المناقشات عن دورة رانكين، انظر النص المتعلق بالديناميكا الحرارية مثلاً في سينجل وبولز [2002، الفصل 9].

دورة أوتّو

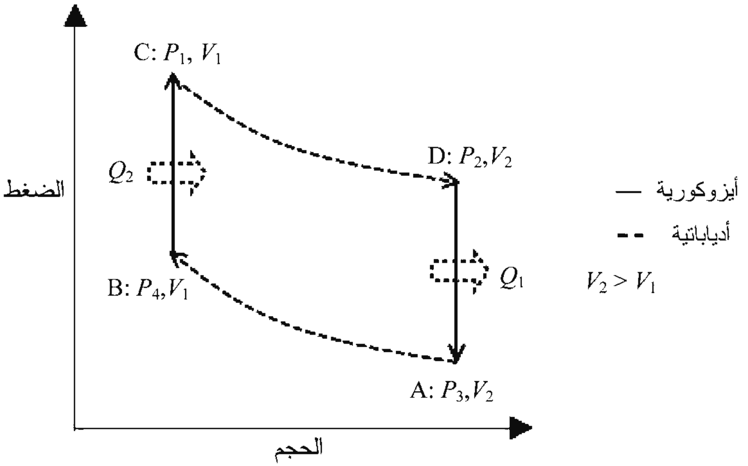
إن محرك البنزين هو محرك الاحتراق الداخلي الذي واصل بأن يكون المحرك المفضل في العربات المصمّمة لوسائل النقل الشخصية. دورة أوتّو (Otto Cycle) هي نموذج رباعي الأشواط لمحرك احتراق داخلي. وسمّيت دورة أوتّو بهذا الاسم نسبة إلى المخترع الألماني نيكولاوس أوغست أوتّو (Nikolaus August Otto) (1832-1891). ويمكننا وصف دورة أوتّو بعملية خماسية المراحل:

أربع من المراحل الخمس عبارة عن أشواط والمرحلة الخامسة هي الاشتعال. الأشواط الأربعة هي الدخول، والانضغاط، والقدرة، والانفلات. هذه المراحل الخمسة مبيّنة في الجدول (4.3) وموضحة أيضاً في الشكل (3.3). المرحلتان الأولى والرابعة هما عمليتان أدياباتيتان، والمرحلة الثانية هي مرحلة الاشتعال، والمرحلتان الثالثة والخامسة هما عمليتان أيزوكوريتان. العملية الأيزوكورية (Isochoric Process) هي العملية التي لا يتغير فيها الحجم ـ أي إن الحجم يبقى ثابتاً خلال العملية. الأشواط والمراحل التي نصفها هنا هي لمحرك البنزين.

يدخل خليط من الهواء والبنزين إلى النظام عند النقطة A خلال شوط الدخول. يتم ضغط الخليط أدياباتيا إلى النقطة B خلال شوط الانضغاط ومن ثم يتم إشعاله. تضاف حرارة Q_2 إلى النظام عندما يحترق الخليط ويزداد ضغط النظام أيزوكوريا إلى النقطة C. التمدد الأدياباتي من النقطة C إلى النقطة D هو شوط القدرة. يُطرد خليط الغاز الساخن بدرجة حرارة Q_1 أيزوكورياً، وينخفض الضغط إلى النقطة A خلال شوط الانفلات.

الجدول (4.3)
مراحل دورة أوتّو

المرحلة	العملية (انظر الشكل (3.3))
الأولى	النقطة A إلى B: انضغاط أدياباتي
الثانية	اشتعال
الثالثة	النقطة B إلى C: زيادة الضغط أيزوكورياً
الرابعة	النقطة C إلى D: انضغاط أدياباتي
الخامسة	النقطة D إلى A: انخفاض الضغط أيزوكورياً



الشكل (3.3): دورة أوتّو

يعبر معامل كفاءة دورة أوتّو بدلالة نسبة الانضغاط r والنسبة بين السعتين الحراريتين م. نسبة الانضغاط r هو النسبة بين أقصى حجم للنظام V_2 إلى أدنى حجم للنظام V_1. القيم النموذجية لنسبة الانضغاط r هي 8 إلى 10. ويمكن كتابة معامل كفاءة دورة أوتّو كما يلي:

$$\eta_{\text{Otto}} = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}}, \quad r = \frac{V_2}{V_1} \quad \text{و} \quad \gamma = \frac{C_P}{C_P} \qquad (3.5.5)$$

إذا كانت $\gamma = 1.4$ و$r = 8$، فإن معامل كفاءة دورة أوتّو هو 0.56 أو 56 في المئة.

6.3 انتقال الحرارة

يمكن للحرارة أن تنتقل من موقع إلى آخر عن طريق الحمل، أو التوصيل، أو الإشعاع. «الحمل» هو انتقال الحرارة عن طريق حركة المادة الساخنة. و«التوصيل» هو انتقال الحرارة نتيجة الاختلاف

في درجات الحرارة بين المواد المتصلة مع بعضها البعض. و«الإشعاع» هو انتقال الحرارة عن طريق إشعاع وامتصاص الموجات الكهرومغناطيسية. هذه الطرق الثلاث لانتقال الحرارة يمكن أن تعمل بشكل منفصل أو مجتمعة مع بعضها.

الحمل

في هذه الحالة، تقوم المادة الساخنة بنقل الحرارة إلى وسط أبرد. بعد ذلك، تُحقق المادة الساخنة والوسط البارد اتزاناً حرارياً عندما تبرد المادة الساخنة ويسخن الوسط البارد. المبادلات الحرارية (سنناقشها في القسم التالي) تعتمد على آلية الحمل لنقل الحرارة من الوسط الأعلى سخونة إلى الوسط الأبرد. وتُستخدم بعد ذلك آلية التوصيل لنقل الحرارة بين النظامين المنفصلين عن طريق موصل حراري.

التوصيل

يمكن للطاقة الحرارية أن تنتقل في أثناء التوصيل بعمليات مثل تصادم الجُزَيئات أو عن طريق حركة الإلكترونات الذرية. معدل التدفق الحراري P_{Heat} خلال شريحة مساحة مقطعها A وطولها L يعطى بالعلاقة التالية:

$$P_{\text{Heat}} = k_{\text{T}} A \left(\frac{T_{\text{Hot}} - T_{\text{Cold}}}{L} \right) \qquad (3.6.1)$$

حيث k_T الموصلية الحرارية للمادة. ودرجة الحرارة الأعلى T_{Hot} تبعد عن درجة الحرارة الأقل T_{Cold} $(T_{\text{Hot}} > T_{\text{Cold}})$ مسافة L. معدل التدفق الحراري هو كمية الحرارة التي تم توصيلها لكل وحدة زمن $P_{Heat} = \Delta Q_{conductred}/\Delta t$ ويُعبَّر عنه في نظام الوحدات SI بوحدة القدرة (الوات). وفي نظام الوحدات SI أيضاً، وحدات A هي

m2، ووحـدات L هـي m، ووحـدات درجـة الـحـرارة هـي K، ووحدات k_T هي W/m.k . ويبيّن الجدول (5.3) الموصلية الحرارية لمواد مختلفة.

الإشعاع

يمكن تعزيز فهمنا للإشعاع من خلال استعراض الخاصية الموجية للضوء. دعنا نعيد إلى الأذهان بأن جيمس كليرك ماكسويل طوّر المعادلات التي تصف الظواهر الكهرومغناطيسية. استخدم ماكسويل معادلاته ليتوقّع بسرعة الضوء. ونفس هذه المعادلات يمكن استخدامها للتوضيح بأن للضوء عدداً من الخصائص الموجية. يبيّن الشكل (4.3) موجة واحدة. طول الموجة من نقطة واحدة على الموجة إلى نقطة مكافئة لها هو الطول الموجي. وعدد الموجات التي تمر خلال نقطة معيّنة، مثلاً النقطة B في الشكل (4.3)، خلال فترة زمنية معيّنة هو تردد الموجة f مقاساً بالدورة لكل ثانية (cycle/s) أو الهيرتز (Hz). والتردد الزاوي w مرتبط بالتردد f بالعلاقة $w = 2\pi f$ ويقاس بوحدة الراد لكل ثانية (rad/s). والزمن الدوري T للموجة يعطى بالعلاقة ويقاس بوحدة الثانية لكل دورة (s/cycle).

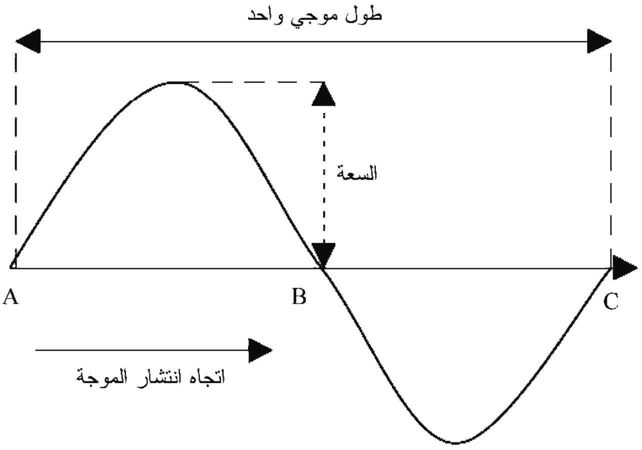
الجدول (5.3) الموصلية الحرارة لمواد مختلفة

المادة عند 25 °C (298.15 K)	الموصلية الحرارية (W/m. K)	المادة عند 25 °C (298.15 K)	الموصلية الحرارية (W/m. K)
هواء	0.026	هيدروجين	0.14*
ألمنيوم	237	حديد	13.9
أسبستوس (ليف رخو)	0.16	حجر جيري (بدفورد، إنديانا)	2.20
خرسانة (إسمنت، رمل، حصى)	1.82	ميكا	0.79

نحاس	401	أكسجين	0.023*
ألماس	907	فضة	429
آجر حراري	0.75	فولاذ (كربون)	60.5
زجاج (بايركس)	1.10	ماء (سائل مشبع)	0.609
ذهب	318	ماء (بخار مشبع)	0.0186
هيليوم	0.14*	خشب	0.04 إلى 0.12*

*يونغ وفريدمان (Young and Freedman) 2000، ص 479].

المصدر: كوهن (Cohen)، 1996، ص 118-119.



الشكل (4.3): الموجة (فانشي (Fanchi)، [2002])

المعادلة الرياضية التي تصف حركة موجة في بُعد فراغي واحد وبُعد زمني واحد هي معادلة الموجة التالية:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \tag{3.6.2}$$

حيث x هي إحداثيات الاتجاه x، وy إزاحة الموجة على طول المحور العمودي y، وt الزمن، وv سرعة الموجة في اتجاه انتشار الموجة. المعادلة (3.6.2) لها نفس صيغة المعادلة التي تصف حركة الضوء. وبهذا، فإن الضوء غالباً ما يُعتقد بأنه حركة موجية.

الحل العام للمعادلة (3.6.2) يمكن كتابته على الصورة التالية:

$$y(x,t) = y(kx - \omega t) \qquad (3.6.3)$$

حيث $k = 2\pi/\lambda$ العدد الموجي بوحدة m^{-1} لموجة طولها الموجي λ بوحدة m وترددها الزاوي w. العدد الموجي له أبعاد مقلوب الطول. والتردد الزاوي (rad/s) مرتبط بتردد الحركة f (Hz) بالعلاقة $w=2\pi f$ والحلول الخاصة لمعادلة الموجة تشمل:

$$\begin{aligned} y(x,t) &= y_0 \cos(kx - \omega t) \\ y(x,t) &= y_0 \sin(kx - \omega t) \\ y(x,t) &= y_0 \exp[i(kx - \omega t)] \end{aligned} \qquad (3.6.4)$$

إلخ.

حيث y_0 السعة الثابتة للموجة. وسرعة الموجة v تحقق العلاقة التالية:

$$v^2 = \left(\frac{\omega}{k}\right)^2 \qquad (3.6.5)$$

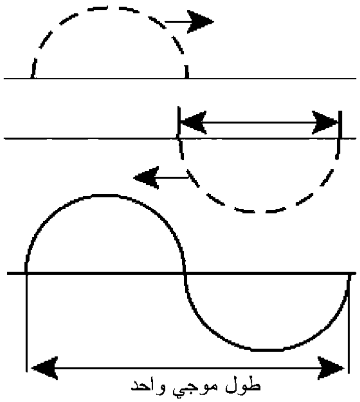
تسمى المعادلة (3.6.5) بعلاقة التشتت؛ وهي تبيّن أن التردد الزاوي دالة في العدد الموجي. وفي مثالنا، فإن علاقة التشتت (Dispersion Relation) لمعادلة الموجة هي:

$$f\lambda = v \quad \text{أو} \quad \omega = kv \qquad (3.6.6)$$

المعادلة (3.6.6) تقول بأن التردد الزاوي يتناسب مع العدد الموجي، وإن حاصل الضرب (التردد في الطول الموجي) يعطينا سرعة الموجة.

من السهل تكوين حركة موجية. على سبيل المثال، نفترض أننا ربطنا حبلاً إلى مقبض باب مغلق. نمسك الطرف الآخر للحبل ونحركه إلى أعلى ثم إلى وضعه الأصلي. يجب أن تتكون نبضة كالمبيّنة في الشكل (5.3) (أ) تتحرك نحو الباب. عندما تصطدم النبضة

بالباب ستنعكس مرتدة نحونا كما هو مبيّن في الشكل (5.3) (ب). هذه النبضة هي نصف موجة ولها نصف الطول الموجي. لعمل موجة كاملة، نحرّك الحبل إلى أعلى ، وإلى وضعه الأصلي، وإلى أسفل، ثم إلى وضعه الأصلي. جميع هذه الحركات يجب عملها بسلاسة وبشكل مستمر. النبضة الناتجة ستبدو كالموجة الكاملة المبيّنة في الشكل (5.3) (ج). ويمكننا عمل عدد من هذه الموجات بتحريك الحبل إلى أعلى وإلى أسفل بشكل منتظم. السلسلة الناتجة من الموجات تسمى «رتل موجي» (Wavetrain).



الشكل (5.3): تكوين موجة (فانشي (Fanchi)، [2002]).

إن الألوان المختلفة للضوء لها أطوال موجية مختلفة وترددات مختلفة. والأطوال الموجية للضوء الذي نراه، أي الضوء المرئي، يمثل فقط شريطاً ضيقاً جداً من الأطوال الموجية للظاهرة العامة المعروفة بالأشعة الكهرومغناطيسية. موجات الراديو مثال للأشعة الكهرومغناطيسية بأطوال موجية طويلة نسبياً تتراوح من جزء من البوصة إلى أعلى من الميل في الطول. والأطوال الموجية للضوء المرئي أقصر بألف إلى تريليون مرة من الأطوال الموجية لموجات

الراديو. كما إن هناك أشعة كهرومغناطيسية بأطوال موجية أقصر من الطول الموجي للضوء المرئي. الطول الموجي للأشعة السينية (X-Rays)، على سبيل المثال، أقصر بمئة إلى ألف مرة من الطول الموجي للضوء المرئي. وأشعة غاما (Gamma Rays)، الناتجة عن الانفجارات النووية، لها أطوال موجية أقصر من الطول الموجي للأشعة السينية. هذا المدى الواسع من الأطوال الموجية يشكل ما يعرف بالطيف الكهرومغناطيسي (Electromagnetic Spectrum).

يصف قانون ستيفان (Stefan) معدل انبعاث الطاقة الإشعاعية على النحو التالي:

$$P_{\text{rad}} = \frac{\Delta Q_{\text{rad}}}{\Delta t} = \sigma A e_{\text{T}} T^4 \qquad (3.6.7)$$

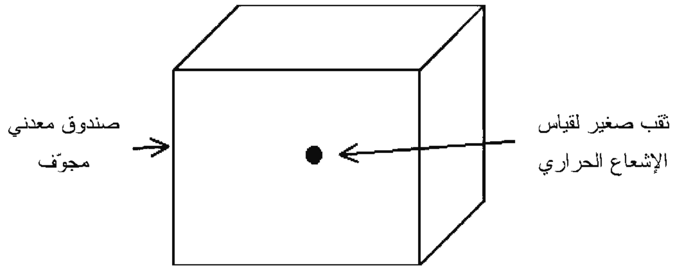
حيث P_{rad} مقاسة بالوات (W)، وA مساحة السطح المشع (m^2)، وσ ثابت ستيفان ـ بولتزمان (Stefan-Boltzmann) ومقداره $5.67 \times 10\ \text{W.m}^{-2}.\ {}^{\circ}\text{K}^{-4}$، و$T$ درجة حرارة الجسم (°K)، وe_{T} الانبعاثية الحرارية للجسم. يشع الجسم طاقة إشعاعية إلى الوسط البارد ويمتص طاقة إشعاعية من الوسط الساخي. صافي معدل انتقال الطاقة الإشعاعية هو:

$$P_{\text{net rad}} = \frac{\Delta Q_{\text{net rad}}}{\Delta t} = \sigma A e_{\text{T}} \left(T^4 - T_{\text{environ}}^4 \right) \qquad (3.6.8)$$

حيث $P_{\text{net rad}}$ بالوات (W) و$T_{environ}$ درجة حرارة الوسط (K). تعتمد الانبعاثية الحرارية e_{T} على مادة الجسم وتتراوح قيمتها بين الصفر والواحد الصحيح. المادة المسامية اللافلزية لها انبعاثية حرارية؛ والانبعاثية الحرارية لسطح فلزي مصقول غالباً ما تكون في المدى . الأسطح القاتمة (dark) لها انبعاثية حرارية أعلى من الأسطح اللامعة (light)، أي إن $(e_{\text{T}})_{\text{dark}} > (e_{\text{T}})_{\text{light}}$. والانبعاثية الحرارية e_{T} تساوي 1 تقريباً للسطح الأسود المعتم.

إشعاع الجسم الأسود

إن الحالة الخاصة للإشعاع الحراري التي تظهر في الكثير من سياقات الطاقة هي إشعاع الجسم الأسود. أحد الأمثلة على الجسم الأسود مبيّن في الشكل (6.3). هذا الجسم الأسود عبارة عن مكعب معدني مجوّف، أو تجويف، به ثقب صغير في أحد أوجهه. وجدران التجويف مطلية بطبقة رقيقة من صبغة سوداء. إذا قمنا بتسخين جدران التجويف، فإن درجة حرارتها سترتفع وتبدأ مادة الجدران بإشعاع أشعة كهرومغناطيسية. ويمكننا دراسة هذا الإشعاع للجسم الأسود بقياس الطول الموجي للشعاع الخارج من الثقب الصغير في وجه التجويف.



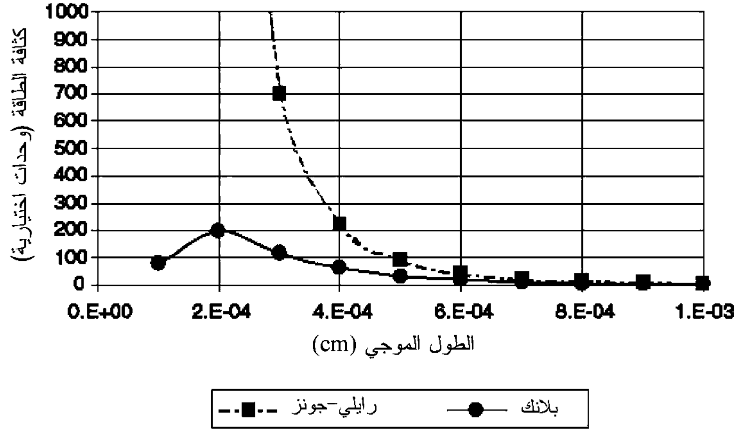
الشكل (6.3): الجسم الأسود

تتبع كثافة الطاقة للإشعاع المشاهد المنبعث من الجسم الأسود المنحنى المسمى «بلانك» (Planck) في الشكل (7.3). وكثافة الطاقة u هي طاقة إشعاع الجسم الأسود لكل وحدة حجم وتعطى بالتوزيع التالي [واينبرغ (Weinberg)، 1988، ص 173]:

$$du = \frac{\frac{8\pi hc}{\lambda^5}}{\left[\exp\left(\frac{hc}{kT\lambda}\right)-1\right]} d\lambda \qquad (3.6.9)$$

وذلك لمدى صغير من الأطوال الموجية λ إلى $\lambda + d\lambda$

وبالإضافة إلى الطول الموجي ودرجة الحرارة T، فإن المعادلة (3.6.9) تعتمد على ثلاث ثوابت فيزيائية أساسية هي: ثابت بلانك h؛ وثابت بولتزمان k؛ وسرعة الضوء في الفراغ c. تسمى المعادلة (3.6.9) بتوزيع بلانك نسبة إلى الفيزيائي الألماني ماكس بلانك، الذي كان أول شخص يستنتج هذه المعادلة.



الشكل (7.3): إشعاع الجسم الأسود

يبيّن الشكل (7.3) رسماً بيانياً لكثافة الطاقة كدالة في الطول الموجي. ومرسوم في هذا الشكل أيضاً الوصف الحسابي لظاهرة الجسم الأسود استناداً إلى النظرية الكلاسيكية للفيزياء (المنحنى المسمّى «رايلي ـ جينز» (Rayleigh-Jeans) في الشكل). وواضح من الشكل (7.3) أن الوصف النظري لرايلي ـ جينز لا يفسر السلوك المشاهد للنظام التجريبي (منحنى «بلانك») عندما يصبح الطول الموجي للشعاع المنبعث صغيراً جداً. هذا الاختلاف بين النظرية الكلاسيكية والتجربة يعرف باسم انهيار فوق البنفسجية (Ultraviolet Catastrophe). النظرية المستندة على الفيزياء الكلاسيكية تتنبأ بأنه يجب أن ينبعث إشعاع من الجسم الأسود شدته كبيرة جداً عند

الأطوال الموجية القصيرة جداً. وبدلاً من ذلك، فإن التجارب توضح بأن الشدة تصبح صغيرة جداً وتتلاشى في النهاية عندما يصبح الطول الموجي صغيراً. فما الخطأ في النظرية الكلاسيكية؟

قدّم بلانك الإجابة عن هذا السؤال في عام 1900. فقد استطاع استنتاج المعادلة (3.6.9)، أي المعادلة التي تتوافق مع النتائج التجريبية، وذلك فقط بافتراض أن الطاقة كانت متغيراً منفصلاً وحققت الشرط التالي:

$$E = nh\nu, \quad n = 0,1,2,... \tag{3.6.10}$$

حيث ν تردد ذبذبة الإشعاع الحراري المنبعث بواسطة الجسم الأسود، وh ثابت بلانك. قبل هذا البحث لبلانك، كان الفيزيائيون يعتقدون بأن الطاقة متصلة. في الحدود الكلاسيكية، ثابت بلانك يؤول إلى الصفر ($h \to 0$) ويمكننا إجراء التقريب التالي للرتبة الأولى في المعادلة (3.6.9):

$$\exp\left(\frac{hc}{kT\lambda}\right) - 1 \approx \frac{hc}{kT\lambda} \tag{3.6.11}$$

والنتيجة هي صياغة رايلي ـ جينز التالية:

$$du = \frac{\frac{8\pi hc}{\lambda^5}}{\left(\frac{hc}{kT\lambda}\right)} d\lambda = \frac{8\pi kT}{\lambda^4} d\lambda \tag{3.6.12}$$

إن المعادلة (3.6.12) هي صياغة منحنى رايلي ـ جينز المبيّنة في الشكل (7.3). إذا أجرينا التكامل على الطول الموجي، نجد أن المعدل الكلي لانبعاث الطاقة من الجسم الأسود يحقق قانون ستيفان ـ بولتزمان بانبعاثية حرارية تساوي 1. وقانون ستيفان ـ بولتزمان يعطينا الفَيض الكلي للطاقة، أو الطاقة التي تمر خلال وحدة مساحة خلال وحدة زمن، المنبعثة من الجسم الأسود U_b على النحو التالي:

$$U_b = \sigma T^4 \qquad (3.6.13)$$

حيث σ ثابت ستيفان ـ بولتزمان.

تتوافق صياغة رايلي ـ جينز مع المعادلة التي كنا سنحصل عليها إذا أخذنا الفرضية الكلاسيكية بأن الطاقة متغير متصل. وكان بلانك قد اضطر إلى رفض هذا المفهوم واستبداله بمفهومه الجديد والواضح إلى حد ما: إن الطاقة تنبعث على شكل حزم منفصلة. وفرضية بلانك بأن الطاقة تنبعث على شكل حزم منفصلة قد تم إثباتها بالعديد من الاختبارات والتطبيقات التجريبية. هذه الحزم المنفصلة للطاقة تسمى «كمّات» (Quanta)، والنظرية التي تعتبر الكمّات جزءاً منها تسمى «النظرية الكمية» (Quantum Theory).

7.3 المبادلات الحرارية

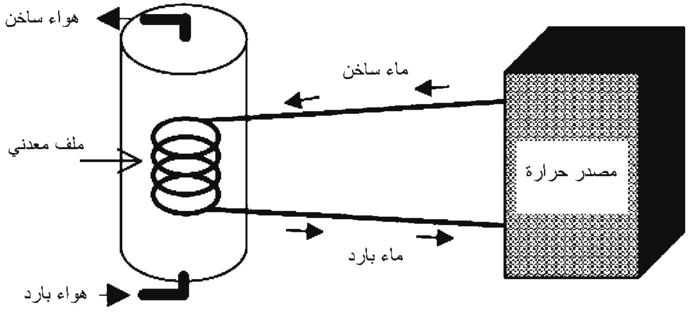
تستخدم المبادلات الحرارية[4] مادة موصلة حرارياً مثل الفولاذ المقاوم للصدأ لفصل مائعين. الحرارة الناتجة من أحد المائعين يمكن نقلها إلى المائع الآخر من خلال المادة الموصلة حرارياً. أحد الأمثلة على المبادلات الحرارية هو المبادل الحراري الملفوف. يحتوي المبادل الحراري الملفوف على أنبوب قطره صغير موضوع داخل أنبوب قطره أكبر بحيث يتحدان مركزياً. هذان الأنبوبان المشتركان محورياً ملفوفان بشكل لولبي. المبادل الحراري البسيط المبيّن في الجهة اليسرى من الشكل (8.3) يستخدم الطاقة الصادرة من الماء الساخن لتسخين الهواء.

إن تدفق المائع داخل المبادل الحراري إما أن يكون طبقياً أو اضطرابياً. ويكون تدفق المائع طبقياً عندما لا تكون هناك حركة للمائع مستعرضة لاتجاه التدفق الحجمي. ويكون تدفق المائع اضطرابياً عندما تكون مركّبات سرعة تدفق المائع متقلبة في جميع

الاتجاهات بالنسبة إلى اتجاه التدفق الحجمي. يصف عدد رينولدز اللابُعدي N_{Re} طريقة التدفق، أو نوع تدفق المائع؛ ويُعرَّف على النحو التالي:

$$N_{RE} = \frac{\rho v D}{\mu} \qquad (3.7.1)$$

حيث ρ كثافة المائع، وv سرعة التدفق الحجمي، وD قطر الأنبوب للتدفق في الأنبوب، وμ معامل اللزوجة الديناميكي للمائع. يكون تدفق المائع طبقياً عندما $N_{Re} \leqslant 2000$، ويكون التدفق اضطرابياً بالكامل عندما $N_{Re} > 6000$ [بارتليت (Bartlett)، 1996، ص 19].



الشكل (8.3): رسم توضيحي لمبادل حراري

يوفر نوع التدفق معلومات عن درجة الخلط والتدرج في الضغط في المبادل الحراري. ويسهّل التدفق الاضطرابي انتقال الحرارة لأن التيارات الدوامية في التدفق الاضطرابي تقوم بخلط المائع. وهبوط الضغط في المبادل الحراري يحدد متطلبات قدرة الضخ. فالهبوط الطفيف للضغط المرافق للتدفق الطبقي يتطلب قدرة ضخ أقل من الهبوط الكبير للضغط المرافق للتدفق الاضطرابي.

يعتمد معدّل الانتقال الحراري للمبادل الحراري على تصميم المبادل الحراري ونوعي تدفق المائع في المبادل الحراري. وعملية

حفظ الطاقة تتطلب بأن تكون الحرارة المنقولة إلى المائع البارد مساوية للحرارة المفقودة بواسطة المائع الساخن. معدل الانتقال الحراري Q مقاساً بالطاقة لكل وحدة زمن يمكن كتابته على الصورة التالية:

$$\dot{Q} = [\dot{m}c(T_{\text{out}} - T_{\text{in}}]_{\text{cool}} = -[\dot{m}c(T_{\text{out}} - T_{\text{in}}]_{\text{hot}} \quad (3.7.2)$$

حيث m معدل تدفق الكتلة مقاساً بالكتلة لكل وحدة زمن، و c الحرارة النوعية، وT درجة الحرارة. والكلمتان السفليتان «in» و«out» تشيران إلى نقطتي الدخول والخروج للمبادل الحراري. وكفاءة المبادل الحراري هي النسبة بين الحرارة الفعلية المنقولة من المائع الساخن للمائع البارد إلى الحرارة التي يمكن نقلها بواسطة المبادل الحراري ذي الحجم المحدد.

تعليقات ختامية

1- المراجع تتضمن وولف [1965، 1967]، وهاليداي وريسنيك [1981]، وسيرواي وفاون [1985]، وغراينر وآخرون (Greiner [et al.]) [1995]، ويونغ وفريدمان [2000].

2- تغيير النموذج مثال على تغيّر النموذج. وقد ناقش العديد من المؤلفين تغيّر النموذج، بما في ذلك (Kuhn, 1970)، ولاكاتوس (Lakatos) [1970]، وروت ـ بيرنشتاين [1989].

3- بعض المراجع الهامة عن مفاهيم الديناميكا الحرارية التي نوقشت في هذا الفصل تشمل بومان [1992]، وغراينر وآخرون [1995]، ويونغ وفريدمان [2000]، وسينجل وبولز [2002]، وبيرنشتاين وآخرون [2000]، وسيرواي وآخرون [1997].

4- المراجع الإضافية على المبادلات الحرارية والتوصيل تشمل

بارتليت [1996]، وسينجل وبولز [2002، الفصل 4]، ويونغ وفريدمان [2000، الفصل 15].

تمارين

1.3 عبّر عن درجة الحرارة $T = 2.7^o\ K$ بالدرجة المئوية والدرجة الفهرنهاتية.

2.3 أ) ما هو التركيب المولاري (Molar Composition) لغاز بالتوزيع الكتلي التالي؟

المكوّنات	الكتلة (kg)	الوزن الجزيئي (kg/ kg mole)
ميثان (Methane) (CH_4)	20	16
إيثان (Ethane) (C_2H_6)	6	30
بروبان (Propane) (C_3H_8)	3	44
ثاني أكسيد الكربون (CO_2)	4	44

تلميح: أكمل الجدول التالي:

المكوّنات	الكتلة (kg)	الوزن الجزيئي (kg/kg mole)	عدد المولات	المول الكسري
CH_4	20	16		
C_2H_6	6	30		
C_3H_8	3	44		
CO_2	4	44		

ب) ما الوزن الجزيئي الظاهري للغاز؟

ج) ما الوزن النوعي للغاز؟

3.3 درجة الحرارة والضغط المعياريتان (STP) لحجم من الغاز بنظام الوحدات SI هما 0 °C و1 ضغط جوي (Atmosphere)، حيث $1\ atm = 1.01 \times 10^5\ Pa$. الحجم المعياري للغاز للعديد من

التطبيقات الهندسية يُحسب عند الظروف القياسية 60 °F و1 atm. استخدم قانون الغاز المثالي لحساب النسبة بين حجم الغاز عند الظروف القياسية V_{SC} إلى حجم الغاز عند درجة الحرارة والضغط المعياريتين V_{STP}.

4.3 درجة حرارة صخرة كروية سوداء تم تعريضها لأشعة الشمس في يوم دافئ هي 110 °F بينما درجة حرارة الهواء المحيط هو 90 °F. إذا تم تعريض نصف الصخرة، وكان نصف قطر الصخرة 2 m، احسب مقدار الطاقة الإشعاعية المنبعثة بواسطة الصخرة خلال فترة العصر بين الظهر والساعة 6 مساءً. عبّر عن إجابتك بالجول (J) وBTU.

3.5 أ) يمكن الحصول على القيم التسخينية الإجمالية المثالية لمكوِّنات الغاز في المؤلفات العلمية، مثل **دليل القياسات البترولية لجمعية معالجات الغاز** (*Gas Processors Association Manual of Petroleum Measurements*). استخدم القيم التسخينية الإجمالية المثالية والمولات الكسرية لمكوِّنات الغاز لإكمال الجدول التالي:

مكوِّنات الغاز	القيمة التسخينية الإجمالية المثالية (H_{ideal}) (BTU/ft^3) (J/m^3)	المول الكسري لمكوِّن الغاز (y_i)	($H_{ideal} \times y_i$) (BTU/ft^3) (J/m^3)
نيتروجين	0.0	0.0030	
ثاني أكسيد الكربون	0.0	0.0042	
ميثان	1009.7	0.9115	
إيثان	1768.8	0.0510	
بروبان	2517.5	0.0157	
أيزو - بروبان (iso-Pentane)	3252.7	0.0038	

n ـ بـــروبـــان -n) Propane)	3262.1	0.0049
أيزو ـ بينتان -iso) Pentane)	4000.3	0.0020
nـ بـــيـنـــتـــان -n) Pentane)	4009.6	0.0020
هيكسان (Hexane)	4756.2	0.0019

ب) هل مجموع المولات الكسرية لمكوّنات الغاز تبلغ الواحد الصحيح؟

ج) ما هي القيمة التسخينية الإجمالية المثالية للغاز بالتركيب المبيّن في الجزء (أ)؟

6.3 تحقق من أن كلاًّ من الدوال الثلاث في المعادلة (3.6.4) هي حل لمعادلة الموجة المعطاة في المعادلة (3.6.2).

7.3 افترض أن أحد الليزرات يشع كمّات من الضوء تسمى الفوتون (Photon) بطول موجي قدره $\lambda = 10.6\ \text{micron} = 10.6 \times 10^{-6}_{m}$ احسب تردد وطاقة الفوتون.

8.3 درجة الحرارة على سطح نجم يشبه الشمس هي تقريباً $6{,}000°$ K. ما مقدار الطاقة المنبعثة في الثانية من جسم أسود درجة حرارته $6.000°$ K؟ عبّر عن إجابتك بالوات.

9.3 أ) افترض أن الماء هو المائع الذي في المبادل الحراري. وافترض أن كثافة الماء هي $\rho = 1g/1cc$ وأن معامل لزوجته الديناميكية هي $\mu = 1cp$ (1 سنتي بواز). إذا كان قطر أنبوب المبادل الحراري $D = 1cm$ ، فاحسب سرعة التدفق الطبقي عند $N_{Re} = 2000$ وسرعة التدفق الاضطرابي عند $N_{Re} = 6000$. عبّر عن السرعتين بوحدة m/s. **تلميح**: حوّل وحدات جميع المعاملات الفيزيائية أولاً إلى نظام الوحدات SI.

ب) احسب معدل الانتقال الحراري للتدفق الطبقي للماء عند $N_{Re} = 2000$ ومعدل الانتقال الحراري للتدفق الاضطرابي للماء عند $N_{Re} = 6000$ افترض أن درجة حرارة الماء تزداد بمقدار 10° C وأن الحرارة النوعية للماء هي 4190 J/kg. k. عبّر عن معدل الانتقال الحراري بوحدات J/s.

10.3 أ) احسب معدل التدفق الحراري خلال أسطوانة من الألمنيوم طولها 2 m ونصف قطرها 0.1 m. وأحد طرفي الأسطوانة سُخّن إلى 200° F والطرف الآخر عند درجة حرارة الوسط المحيط 60° F.

ب) احسب معدل التدفق الحراري خلال أسطوانة من زجاج البايركس طولها 2 m ونصف قطرها 0.1 m. وأحد طرفي الأسطوانة سُخّن إلى 200° F والطرف الآخر عند درجة حرارة الوسط المحيط 60° F. قارن إجابتك بالجزء (أ).

11.3 أ) احسب معدل الفقد الحراري خلال نافذة ذات لوح زجاجي واحد سماكته 1/4 inch. مساحة النافذة هي 3 ft في 4 ft. افترض أن درجة الحرارة الخارجية هي -6.7°C ودرجة الحرارة الداخلية هي 21.1 °C.

ب) احسب معدل الفقد الحراري خلال نافذة ذات لوح زجاجي مزدوج يفصلهما فراغ هوائي سماكته 1/8 inch وسماكة كل لوح زجاجي 1/4 inch. مساحة النافذة هي 3 ft في 4 ft. افترض أن درجة الحرارة الخارجية هي -6.7°C ودرجة الحرارة الداخلية هي 21.1° C.

الفصل الرابع

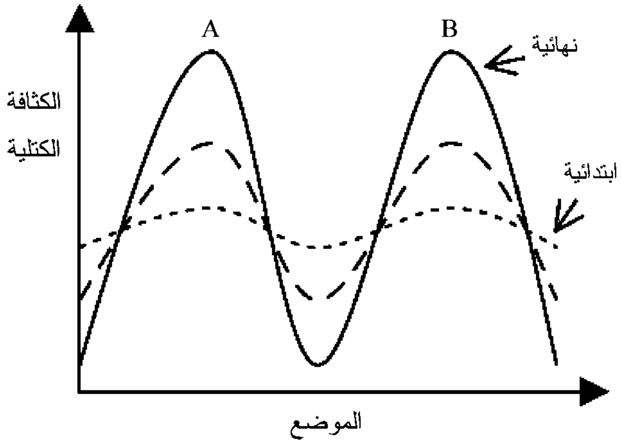
الأرض والطاقة الجيوحرارية

بالنسبة إلينا، إن الأرض هي الكوكب الصلب الذي تحت أقدامنا. والأرض أيضاً جسم سماوي. يعتقد العلماء بشكل عام أن الأجسام السماوية مثل السدم الغازية، والمجرّات، والنجوم، والكواكب تشكّلت من الغازات الذرية التي نفذت إلى الكون بعد الانفجار العظيم (Big Bang). هذه الأجسام السماوية قد تخدم كمصادر هامة للطاقة في القرن الواحد والعشرين. وأحد التصورات الممكنة لتشكّلها نشرحه في القسم التالي[1]. ندرس بعد ذلك موضوع الطاقة الحرارية المختزنة في باطن الأرض: الطاقة الجيوحرارية (Geothermal Energy).

1.4 تشكُّل الأجسام السماوية

تبذل التراكمات الكثيفة نسبياً للمادة جذباً تثاقلياً أقوى من التراكمات الأقل كثافة للمادة في المناطق المجاورة من الفضاء. وتسهّل التدرجات في قوى التجاذب عملية التراكم الموضعي للمادة كما توفر آلية لزيادة التراكم الموضعي. يصوّر الشكل (1.4) هذا التأثير بعرض الزيادة في الكثافة الكتلية من الحالتين الابتدائية إلى النهائية

حول النقطتين A وB. أسْر الجاذبية للمادة يزيد أيضاً من الجذب الكلّي للجاذبية للتراكم المتزايد. هذا التأثير المتزايد سريعاً يؤدّي إلى كون بأبعاد شاسعة تفصلها مناطق محتوية على كميات كبيرة من المادة.



الشكل (1.4): التراكم الموضعي للمادة

إن اختراق الكون الذي برد كثيراً، وفقاً للنظرية الكونية، هو أثر للانفجار العظيم: الأشعة الخلفية الميكروويفية. الأشعة الخلفية الميكروويفية هي مثال على إشعاع الجسم الأسود. والأشعة الخلفية الميكروويفية هي أشعة ميكروويف بدرجة حرارة $2.7° K$ تقريباً. اكتشاف أرنو بينزياس وروبرت ويلسون (Arno Penzias and Robert Wilson) لهذه الأشعة الخلفية في عام 1965 تأكيد تجريبي هام لنموذج الانفجار العظيم في علم الكون.

تبدو المناطق من الفضاء التي لها تركيز كثيف نسبياً من المادة للوهلة الأولى أنها سحب غازية بالنسبة إلى المناطق المجاورة التي لها تركيز أقل كثافة من المادة. السدم الغازية، مثل إيتا كارينا Eta)

(Carinae) وسدم رأس الحصان (Horsehead Nebulae)، أمثلة حديثة على تلك المناطق. وبمرور الوقت، فإن الاضطرابات الموضعية لتوزيع المادة ضمن السحب الغازية تؤدي إلى التحام إضافي للمادة لتشكيل النجوم. وليس بالضرورة أن تلتحم كل المادة البدائية لتشكيل النجوم. فبعض السحب الموضعية الغازية الكثيفة ليست ضخمة بما يكفي وليست لها طاقة تكفي لخلق القوى النووية اللازمة لتوازن قوى الجاذبية الموجودة في السحب الملتحمة. وتلك السحب التي تستطيع تأسيس توازن بين التنافر النووي والتجاذب نتيجة الجاذبية تصبح نجوماً.

إن المكوِّن الهام جداً للنجم الوليد هو الهيدروجين، الذرة الأبسط والأكثر وفرة في الكون. ويأتي في المرتبة الثانية الهيليوم، ومن ثم عناصر أخرى مثل الأكسيجين، والنيتروجين، والكربون. والهيدروجين هو الوقود الأساسي لتفاعلات الاندماج النووي: ذرتان من الهيدروجين تندمجان معاً في مركز السحابة الكثيف الحار الملتحم لتكوين الهيليوم. وليست جميع الكتلة والطاقة لذرتي الهيدروجين مطلوبة لتكوين الهيليوم. الفائض منها يتحول إلى طاقة كهرومغناطيسية، كما إنها المصدر الرئيسي للإشعاع الشمسي. يقوم النجم بحرق وقوده من الهيدروجين الذري كلما ازداد عمره. وفي أثناء عملية حرق الهيدروجين، ينمو مركز النجم ويزداد ضغطه ودرجة حرارته. وفي النهاية، يصبح ضغط ودرجة حرارة مركز النجم عاليين بما فيه الكفاية للبدء بحرق الهيليوم. هذه التفاعلات النووية ـ حرق الهيدروجين والهيليوم ـ تعتبر عمليات هامة في تكوين ذرّات أكبر مثل الحديد والماغنيسيوم. وسنناقش لاحقاً التفاعلات النووية ودورها في تقنية الطاقة النووية بالتفصيل.

2.4 فرضية كنْت ـ لابلاس

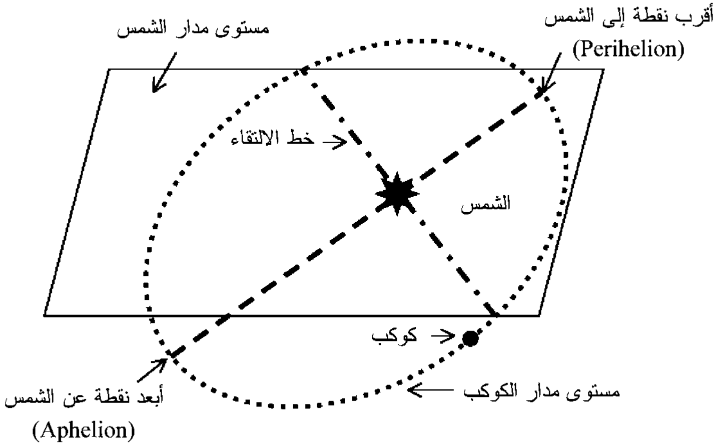
تقدّم المناقشة السابقة نموذجاً للتنوع الوافر للمصير الحادث للمادة البدائية كلما ازداد عمر الكون. هذا التصوّر ناتج عن أفكار اقتُرحت في بادئ الأمر من قِبَل الفيلسوف الألماني إيمانويل كنْت (Immanuel Kant) في عام 1755، ومن ثم وبشكل منفصل من قِبَل عالم الرياضيات الفرنسي بيار لابلاس (Pierre Laplace) في عام 1796. وفرضية كنْت ـ لابلاس هي تصوّر بأن النظام الشمسي تشكّل من سحابة من الغاز والغبار تدور في مدار دائري. هذه الفرضية هي أساس النظريات الحديثة للتشكُّل السديمي، والمجرّي، والنجمي، والكوكبي.

إن من ضمن الأدلة الداعمة لفرضية كنْت ـ لابلاس مشاهدات القمر الصناعي الفلكي تحت الأحمر (Infrared Astronomical Satellite (IRAS)). أُطلق هذا القمر الصناعي في رحلة لمسح السماء للبحث عن أشعة تحت الحمراء (حرارة) في 25 كانون الثاني/ يناير عام 1983. ووفقاً لنشرة الحقائق التابعة لمختبر الدفع النفاث (jet Propulsion Laboratory)، فإن القمر الصناعي IRAS اكتشف «. . .عدداً كبيراً من السحب الصغيرة من الغاز والغبار الجُزَيئي التي تعتبر مواقع لتشكُّل النجوم مثل شمسنا. . . كما اكتشف المسح بأن العديد من السحب السوداء المجاورة، بعضها ضمن 650 سنة ضوئية من الأرض، تأوي نجوماً تشكّلت حديثاً في مرحلة النشوء تماماً مثل الشمس عندما تشكّلت قبل 4.6 بليون سنة» [مختبر الدفع النفاث (jet Propulsion Laboratory)، 1984]. واكتشافات القمر الصناعي IRAS لم تقتصر على النشاط النجمي: «اثنان من الاكتشافات الهامة جداً خلال رحلة العشرة أشهر للقمر الصناعي كانت اكتشافات المادة الصلبة حول النجمين فيغا (Vega) وفومالهاوت (Fomalhaut) (26 و22 سنة ضوئية من الأرض، على التوالي). . . وقدمت الاكتشافات

أول دليل مباشر على أن أجساماً صلبة ذات حجم كبير توجد حول نجم غير الشمس» [مختبر الدفع النفاث، 1984].

نعلم اليوم بأن الوسط بين النجوم يحوي نوى ذرية، وجُزَيئات، وحُبيبات من «الغبار النجمي» [هيستر وآخرون (Hester, [et al.]) 2002، القسم 2.14؛ وتايلور (Taylor)، 2001، الفصل 4]. إن 90 في المئة تقريباً من النوى الذرية هي نوى الهيدروجين (H)، و9 في المئة نوى الهيليوم (He). وبقية النوى الذرية تشمل نوى الكربون (C)، والأكسجين (O)، والنيون (Ne)، والصوديوم (Na)، والماغنيسيوم (Mg)، والألمنيوم (Al)، والسيليكون (Si)، والكبريت (S)، والكالسيوم (Ca)، والحديد (Fe)، والنيكل (Ni)... إلخ. وجُزَيئات الوسط بين النجوم تشتمل على الهيدروجين (H_2)، وأول أكسيد الكربون (CO)، والميثان (CH_4)، والنشادر (NH_3)، وحمض الهيدروكلوريك (HCl)، وأكسيد السيليكون (SiO)، وكلوريد الصوديوم (NaCl)، والماء (H_2O)، وثاني أكسيد الكبريت (SO_2)، وكبريتيد الهيدروجين (H_2S)، وكلوريد البوتاسيوم (KCl). والجُزَيئات الأكثر تعقيداً في الوسط بين النجوم تتضمن الميثانول (CH_3OH) والأسيتون [$(CH_3)_2CO$)]. لاحظ أن كلاً من الجُزَيئات العضوية وغير العضوية موجودة في الوسط بين النجوم. ووجود الجُزَيئات العضوية في الفضاء قد شجع على الاعتقاد من قِبَل البعض في نشأة الحياة خارج كوكب الأرض، كما سنناقش لاحقاً في القسم 5.5. ويحتوي الغبار الذي بين النجوم على حُبيبات من المادة شبيهة بسخام الشمعة. والمادة الموجودة في الغبار الذي بين النجوم تتكوّن من مواد غير عضوية مثل الكربون والسيليكات بالإضافة إلى مركبات عضوية وجليدية. مصدر الكثير من المواد الموجودة في الفضاء سنناقشه في الفصل العاشر عندما نناقش الاصطناع النووي (Nucleosynthesis).

تزوّدنا الكواكب في نظامنا الشمسي بدليلين إضافيين يدعمان فرضية كنْت ـ لابلاس لتشكُّل الكواكب. الدليل الأول يأتي من مشاهدَات مدارات الكواكب. معظم مدارات الكواكب تقع في مستوى مدار الشمس. «مستوى مدار الشمس» (Ecliptic Plane) هو المستوى الذي يتقاطع مع الشمس كما هو مبيّن في الشكل (2.4). خط التقاطع بين مستوى مدار الكوكب ومستوى مدار الشمس هو «خط الالتقاء» (Line of Nodes). مدارا أبعد الكواكب بلوتو وأقرب الكواكب عطارد مائلان بزاوية طفيفة بالنسبة إلى مستوى مدار الشمس. وزاويتا ميلان مدارَي عطارد وبلوتو بالنسبة إلى مستوى مدار الشمس هما حوالي 7 درجات لعطارد و17 درجة لبلوتو.



الشكل (2.4): مدار الكوكب ومستوى مدار الشمس

والدليل الثاني يأتي من مشاهدَات اتجاه دوران مدارات الكواكب بالنسبة إلى اتجاه دوران الشمس. تدور الشمس حول محورها تماماً مثل الدوّامة الدوّارة. وجميع الكواكب التسعة التابعة للنظام الشمسي تدور في اتجاه دوران الشمس نفسه. هاتان الحقيقتان المشاهدتان ـ اتجاه الدوران المداري، والمدارات المحصورة في مستوى مدار

الشمس ـ تقترحان بأن الشمس والكواكب تشكّلت من غبار وحطام سحابة غازية تدور في مدار دائري.

قام جوهانّس كيبلر (Johannes Kepler) بقياس حركة الكواكب في عام 1619 مستخدماً مشاهدَات تايكو براهي (Tycho Brahe) لحركة كوكب المريخ. ومن الدليل التجريبي، صاغ كيبلر ثلاثة قوانين لحركة الكواكب:

1 ـ إن مدار الكوكب هو على شكل قطع ناقص والشمس عند بؤرة واحدة من القطع الناقص.

2 ـ يقع مدار الكوكب في المستوى الذي يمر خلال الشمس، والمساحة الممسوحة بواسطة الخط الذي يصل بين الشمس والكوكب تتناسب مع الزمن المنقضي.

3 ـ زمن الدورة الواحدة، أو الزمن الدوري T، للكوكب حول الشمس يتناسب مع $a^{3/2}$ حيث a نصف المحور الأكبر لمدار القطع الناقص للكوكب.

يمكن استخدام الميكانيكا الكلاسيكية لإسحق نيوتن لاستنتاج قوانين كيبلر. وبالقيام بذلك، نجد أن الزمن الدوري T لمدار الكوكب يعطى بالعلاقة التالية:

$$T = \frac{2\pi a^{3/2}}{\sqrt{Gm_s}} \quad (4.2.1)$$

حيث a هو نصف المحور الأكبر، وG هو ثابت الجاذبية لنيوتن، وm_s هي كتلة الشمس. والمعادلة (4.2.1) هي تعبير لقانون كيبلر الثالث.

التصادمات السماوية

تُعتبر فرضية كنْت ـ لابلاس نظرية للجسم الواحد لأنها لا تتطلب تصادماً بين الأجسام السماوية. والبدائل لفرضية كنْت ـ

لابلاس للجسم الواحد هي نظريات الجسم الثاني. تقوم نظريات الجسم الثاني بتوظيف فكرة اقتراب جسمين سماويين من بعضهما كآلية أساسية لتكوين جسم سماوي ثالث. على سبيل المثال، في العام 1750 افترض عالِم الطبيعة الفرنسي جورج دو بوفُّون (Georges de Buffon) بأن الكواكب تشكّلت من الشمس وذلك بمرور جسم كبير مثل المذنّب. وتقدَّم أستاذان من جامعة شيكاغو بنظرية أحدث للجسم الثاني المتعلقة بتشكُّل الكواكب في عام 1905، فقد برهن شامبرلين ومولتون (T. C. Chamberlain and F. R. Moulton) بأن الجسم الثاني لم يكن مذنّباً، كما افترض بوفُّون، بل كان نجماً. فكلما اقترب نجمان من بعضهما، تقوم قوى الجاذبية القوية بسحب مادة نجمية من كل من النجمين نحو الآخر. ومن المعتقد أن كميات كبيرة من المادة انتُزِعت أساساً من موطنهما الشمسي. وفي الفراغ البارد بين النجمين تبرد المادة وتتكاثف بواسطة الانكماش نتيجة الجاذبية إلى «قطرات» بحجم الكواكب.

كانت فكرة التصادم بين جسمين فلكيين أو اقترابهما من بعضهما تعتبر بعيدة الاحتمال تماماً لأن تكون الآلية الأساسية لتشكّل الجسم السماوي. فالمسافات بين الأجسام السماوية كبيرة جداً لدرجة أن احتمال اقترابها من بعض صغير. الدراسات الحديثة للقمر، بما في ذلك دراسة الصخور القمرية التي أحضرها روّاد المركبة الفضائية أبوللو، تدعم النظرية القائلة بأن القمر هو في الواقع قطعة من الأرض وأنه انفصل عن الأرض بعد اصطدامها بجسم سماوي ضخم[2]. وهناك أمثلة أخرى معروفة للتصادمات بين الأجسام السماوية، مثل تصادم المجرّتين NGC 4038 وNGC 4039. اسما هاتين المجرّتين، اللتين تبعدان عن الأرض بحوالي 50 مليون سنة ضوئية، يشيران إلى رقم فهرستهما في الفهرس العام الجديد (*New General Catalogue*). بدأ الفهرس العام الجديد بمجموعة من المجرات من قِبَل الفلكي

الإنجليزي الألماني المولد وليام هرشل (William Herschel). وواصل ابنه جون (John) العمل ونشر **الفهرس العام للسدم** (*General Catalogue of Nebulae*) في عام 1864. ونشر درير (J. L. E. Dreyer) إصداراً موسعاً للفهرس العام الجديد في عام 1888.

لا يعرف العلماء الآلية الدقيقة لتشكّل الجسم السماوي. ومن المحتمل أن العديد من الآليات قد أدت دوراً هاماً في مناطق مختلفة من الكون. ويعتقد معظمهم بأن تغيّراً ما في فرضية كنْت ـ لابلاس كانت الآلية الأساسية. وعلى الرغم من جهلنا، فإننا نستطيع أن نبدي ببعض من الثقة ما كان عليه تسلسل التكوين. هذا التسلسل ملخص في الجدول (1.4)، ويشتمل على تقديرات للزمن الذي وقع فيه الحدث. وبشكل عام، فإن تشكّل السديم هو السلف اللازم لتشكّل النجوم وتحوّل السديم إلى مجرّة. وتشكّل الكواكب إما أن يتبع أو يتزامن مع تشكّل النجم، وهذا يعتمد على آلية التكوين. لقد وصلنا إلى نقطة من نشأة الكون حيث عندها يجب أن نتحدث عن النشأة الفيزيائية للكواكب، مع تركيز اهتمامنا بشكل خاص على الأرض.

الجدول (1.4) الجدول الزمني لتشكّل الكواكب

الزمن	العصر	الحدث
قبل 14 إلى 15 بليون سنة	فلك الاقتران (Decoupling Era)	تبدأ المجرات بالتشكّل والتجمع
قبل 10 بليون سنة		تشكّل النجوم الأولى
قبل 4.5 بليون سنة		تشكّل السحابة بين النجمية للأرض
قبل 3.9 بليون سنة	الحياة العتيقة (Archeozoic Era)	تشكّل أقدم الصخور الأرضية

3.4 نشأة الأرض البدائية

حتى بداية القرن العشرين، استطاع الباحثون دراسة الأرض فقط من سطحها. وأصبحت النظرة الواسعة لكوكبنا ممكنة مع بدء

الطيران. واليوم نستطيع أن نرى كوكبنا من منظور فضائي. وقد طوّرنا معرفتنا بالكوكب الذي نعيش عليه مع كل تقدم تكنولوجي. يمكننا اليوم استخدام الأقمار الصناعية والقياسات الحساسة للتغيرات الطفيفة للجاذبية على سطح الأرض لنرى بفاعلية خلال المحيطات ونكوّن رؤية واضحة عن القشرة الخارجية الصلبة للأرض. وتتيح لنا كواشف خاصة للزلازل قياس سرعة انتشار الاهتزازات شبه الموجية الناجمة عن الزلازل الأرضية والانفجارات النووية. هذه القياسات الزلزالية تعطينا صورة غير مباشرة عن باطن الأرض. وبالإضافة إلى ترسانة من الأجهزة القوية التي نملكها لتوسيع مداركنا، نستطيع أيضاً النظر إلى ماضي الأرض ببساطة من خلال النظر إلى الأخدود الكبير في ولاية أريزونا، أو فحص البقايا الأحفورية من سيبيريا، أو دراسة نواتج حفر آبار النفط والغاز التي تم حفرها في القشرة الأرضية. والمشاهدات الوفيرة التي تم الحصول عليها من مجموعة الوسائل الممارسة بواسطة العديد من علماء الجيولوجيا على مدى عدة عقود هي المادة الخام التي تقوم عليها الصورة الحديثة للأرض[3].

لنتصور سحابة من الغاز والغبار تتحرك حركة دائرية. التجاذب نتيجة الجاذبية بين مكوّنات السحابة يكون أعلى ما يمكن بالقرب من المركز. مع انهيار السحابة، فإن الزيادة في الضغط ودرجة الحرارة في قلب (لب) السحابة تصبح في النهاية عالية بما فيه الكفاية لإشعال عمليات الاندماج النووي: تُولَد الشمس. تراكم أو تجمُّع المادة تعمل على خلق الكواكب الأولية (Protoplanets). ويستمر شكل الشمس بتحديد نفسه بينما الاضطرابات في السحابة المتحركة بحركة دائرية والمحيطة بالنجم الوليد تلتحم على شكل كواكب أولية وتصبح في نهاية المطاف

الكوكبين الغازيين الكبيرين المشتري وزحل. وحبيبات الغبار، التي يتكون بعضها من عناصر ثقيلة نسبيّاً مثل الحديد والماغنيسيوم، تتراكم في أجزاء أخرى من السحابة التي تحيط بالشمس. هذه التراكمات الثقيلة تسمى كويكبات (Planetesimals) وهي أسلاف للكواكب عطارد، والزهرة، والأرض، والمريخ. ونمو الكويكبات هو الأعظم بالقرب من الشمس حيث الحطام السديمي يكون وفيراً جداً، ومع ذلك فالمسافة ليست قريبة جداً بحيث ينجذب الحطام نحو الشمس.

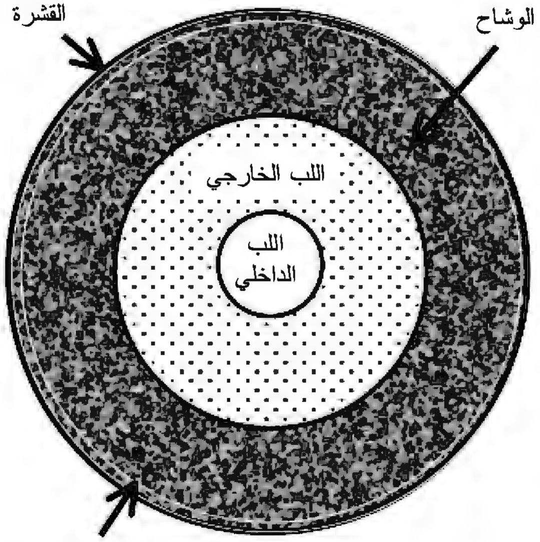
يكتسب اللب الكثيف لكل كويكب سطحاً خارجياً ذا مادة أقل كثافة من السحابة الغازية الجزيئية المتضائلة. والضغط نتيجة الجاذبية من السطح الخارجي للكويكب يولّد ضغطاً داخلياً كبيراً. كما ترتفع أيضاً درجة الحرارة، جزئياً بسبب الضغط نتيجة الجاذبية المدمر، وجزئياً بسبب التفاعلات النووية. وفي النهاية، فإن ضغط ودرجة حرارة باطن الكويكب يصبحان كبيرين بما فيه الكفاية لصهر جزء من اللب الذي كان صلباً ذات مرة. وبالتحرك نحو الخارج من الداخل نجد أن الضغط ودرجة الحرارة تنخفضان كلما انخفضت كمية المادة الحابسة واقتربنا من الجزء البارد للفراغ. العناصر المشعة الأثقل تتحرك نحو المركز بينما تتحرك العناصر الأخف نحو سطح الكويكب. والكويكبات كبيرة بما فيه الكفاية للاحتفاظ بغلاف جويّ غازي من العناصر الخفيفة، بما في ذلك الهيدروجين والهيليوم. وتتفاوت أجواء الكويكبات ما بين أثر ضئيل من الهيليوم في حالة كوكب عطارد إلى غلاف جوي من الجُزَيئات مثل النشادر والميثان. والجُزَيئات الأخف، وخصوصاً الهيدروجين، تفلت من جذب الجاذبية للكويكبات.

يتجسد في هذا التصور من تشكّل الكواكب تفسير بعض

الحقائق المشاهدة. المقطع العرضي لباطن الأرض مبيّن في الشكل (3.4) وهو مقسّم إلى لب داخلي، ولب خارجي، ووشاح، وقشرة. وقد بيّنت القياسات الزلزالية لموجات الزلازل بأن لب الأرض يحتوي على معدن منصهر يغلف اللب الصلب. والخصائص الكهربائية والمغناطيسية للأرض، وأيضاً كثافة لب الأرض، تقدم دليلاً تحدد فيه نوع المعدن بأنه خليط من الحديد والنيكل؛ وأن الحديد هو العنصر السائد. ووجود لب داخلي صلب يدل على أن بذرة الكويكب لم تنصهر بالكامل. ونصف قطر اللب تقريباً 3500 كيلومتر (2200 ميل) ويتكوّن من لب داخلي بلّوري ولب خارجي منصهر.

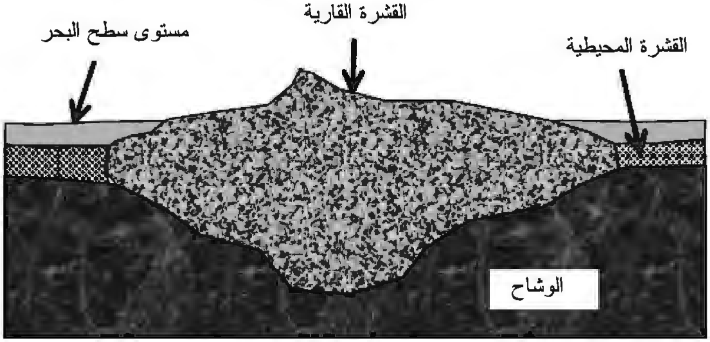
إن الجزء الخارجي من لب الأرض هو وشاح صخري سماكته 2900 كيلومتر (1800 ميل). ويعتقد بأن الوشاح أساساً عبارة عن بازلت، وهو صخر بركاني أسود. ويتكون البازلت من ماغنيسيوم وسيليكات الحديد. والبازلت على سطح الوشاح يوجد في حالة شبه منصهرة. هذه الطبقة شبه المنصهرة من البازلت تسمى الأسثينوسفير (Asthenosphere) (أو الغلاف الضعيف). وكلما تعمقنا خلال الوشاح، تزداد صلابة البازلت إلى أن يكتسب الوشاح صلابة تماثل صلابة الفولاذ.

إن نسبة الحديد إلى الماغنيسيوم والسيليكون في الأرض تقريباً هي نفس النسبة المشاهدة في النجوم مثل شمسنا. وهذه المشاهدة تضفي دعماً على نماذج تشكّل الكواكب التي تتوافق مع نماذج تشكّل النجوم. والمواد المستخدمة لتشكيل الشمس والكواكب تبدو أنها من نفس المصدر.



الشكل (3.4): باطن الأرض

في أعلى الوشاح توجد القشرة بسماكة 30 كيلومتراً (19 ميلاً) تقريباً. يبيّن الشكل (4.4) رسماً توضيحياً للقشرة الأرضية. تتكوّن القشرة القارية الغرانيتية أساساً من السيليكا والألمنيوم؛ وتحتوي القشرة المحيطية على السيليكا والماغنيسيا. وتحت القشرتين القارية والمحيطية توجد طبقة من البازلت الصلب. وفي الحد الفاصل بين البازلت القشري والبازلت شبه المنصهر من الوشاح يوجد الانقطاع الموهوروفي (Mohorovicic Discontinuity)، أو الموهو باختصار. ومجموع القشرة والبازلت الصلب أعلى الموهو يعرف بالليثوسفير (Lithosphere) (أو الغلاف الصخري).



الشكل (4.4): القشرة الأرضية

والليثوسفير هو الجزء المتحرك من الوشاح العلوي والقشرة. تتزحزح الصفائح الليثوسفيرية على مادة أكبر كثافة ومنصهرة جزئياً تسمى الأستينوسفير. مع برودة الأرض من حالتها الغازية الساخنة، كان سطح الأرض خاضعاً لقوى أدت إلى تسبّب في تغيرات كبيرة في طوبوغرافيتها (تضاريسها وسماتها السطحية)، بما في ذلك تشكّل القارات وبروز السلاسل الجبلية. والضغط القادم من باطن الأرض أدى إلى تصدع في قاع البحر وسمح للمادة المنصهرة الأقل كثافة بالتدفق إلى قاع البحر. هذه التصدعات في القشرة الأرضية تسمى حواف قاع البحر (Subsea Ridges).

تبيّن الدراسات المنبثقة من الحواف تحت البحرية أن المادة انتشرت جانبياً على كل جانب من الحافة. وتناسق المادة المنتشرة على كل جانب من الحافة تدعم الرأي القائل بأن المادة كانت في حالة منصهرة عندما تحركت تدريجياً نحو الخارج من الحافة. مع برودة المادة، قامت المكوّنات المغناطيسية داخل المادة المنصهرة بترتيب نفسها مع قطبية المجال المغناطيسي للأرض في الوقت الذي كانت فيه المادة تتجمد. وقد تم تحديد عدة فترات للاستقطاب وتحديد مدتها.

إن القياسات التي أجريت بواسطة الأقمار الصناعية لمجال الجاذبية الأرضية ميّزت الحدود الفاصلة بين القارات. وأشكال هذه الحدود دلالة على صفائح واسعة. هذه الصفائح تسمّى الصفائح التكتونية (Tectonic Plates)، وموضوع دراسة سلوكها هو تكتونية الصفائح (Plate Tectonics).

نحن نعيش على الليثوسفير. وتاريخ الليثوسفير متشابك مع تاريخ توزيع الحياة. وكما هو الحال مع تاريخ البشرية، يجب تطوير تسلسل زمني للأحداث التي وقعت. وفي حالة تاريخ الليثوسفير، فإن التسلسل الزمني للأحداث يعتمد كثيراً على تقنية تُعرف باسم تحديد العمر إشعاعياً[4] (Radioactive Dating). ويعتمد تحديد العمر إشعاعياً على كشف النشاط الإشعاعي من اضمحلال النوى الذرية. فبالإضافة إلى توفير وسيلة لتحديد عمر الصخور، فإن النشاط الإشعاعي يقوم بتوفير طاقة لتسخين باطن الأرض. النشاط الإشعاعي هو موضوع القسم التالي.

4.4 النشاط الإشعاعي

يُستخدم عدد البروتونات في نواة أيّ عنصر لتصنيف العنصر بدلالة شحنته الكهربية الموجبة. ويتم الحصول على النظائر عندما تضاف النيوترونات المتعادلة كهربياً إلى أو تطرح من نواة العنصر. ويحدث التغيّر في عدد النيوترونات بعدة طرق. ومن الطرق التي تتم لتغيير النواة تشمل الانبعاث النووي لنوى الهيليوم (جُسَيمات ألفا (alpha))، أو الإلكترونات (جُسَيمات بيتا (beta))، أو الفوتونات ذات الطاقة العالية (أشعة غاما (gamma)). ويقال للنظير إنه يضمحل إشعاعياً عندما يتغير عدد البروتونات في نواته. والعناصر الناتجة بواسطة الاضمحلال الإشعاعي تسمى نواتج الاضمحلال.

اضمحلال الجُسَيمات

من الناحية التجريبية، فإن معدّل اضمحلال مجموعة من الجُسَيمات غير المستقرة يتناسب مع عدد الجُسَيمات. ويمكن وصف ذلك معملياً باستخدام توزيع الاحتمال الأُسّي (أو توزيع احتمالية بوازون (Poisson)). لنفترض أن $N(t')$ عدد الجُسَيمات المشاهدة عند الزمن t' وأن العدد الكلي للجُسَيمات عند الزمن $t' = 0$ هو $N(0)$. بالتالي، فإن عدد الجُسَيمات المضمحلة خلال الفترة الزمنية t' إلى $t' + dt'$ هو:

$$dN(t') = -\lambda N(t')\,dt' = -A\,dt' \qquad (4.4.1)$$

حيث λ الاحتمال الثابت لاضمحلال الجُسَيم لكل وحدة زمن. وحاصل الضرب $A = \lambda N(t')$ هو نشاط العينة المشعة.

بإجراء التكامل في المعادلة (4.4.1) من $t' = 0$ إلى $t' = t$ نحصل على ما يلي:

$$N(t) = N(0)e^{-\lambda t} \qquad (4.4.2)$$

المعادلة (4.4.2) تمثل الاضمحلال الأُسّي للجُسَيم غير المستقر. ومعدل الاضمحلال هو:

$$R = \frac{dN(t)}{dt} = -\lambda N(t) \qquad (4.4.3)$$

واحتمال مشاهدة الجُسَيم عند الزمن t هو:

$$P_{obs} = \frac{N(t)}{N(0)} = e^{-\lambda t} \qquad (4.4.4)$$

تُستخدم المعادلة (4.4.4) عادة لوصف نتائج الظواهر. وتجدر الإشارة إلى أن الجُسَيم غير المستقر لا يحتفظ بالاحتمالية ضمن سياق نظريات الكم الاصطلاحية التي تعاير (Normalize) الاحتمال على الحجم الفراغي فقط[5].

مقاييس النشاط الإشعاعي

توجد مقاييس مختلفة لقياس النشاط الإشعاعي[6]. ذكرنا في المعادلة (4.4.1) نشاط العينة المشعة. ونشاط العينة هو عدد الاضمحلالات لكل ثانية، ويقاس بالكيوري (Curie). واستُخدمت وحدة الكيوري، التي يرمز لها Ci، تخليداً للرائدين في دراسة النشاط الإشعاعي الفيزيائيين الفرنسيين بيار وماري كوري (Pierre and Marie Curie). وواحد كيوري يساوي 3.7×10^{10} اضمحلال لكل ثانية. ويحتوي الكيوري فقط على معلومات عن عدد الاضمحلالات الحادثة.

ويُستخدم الرونتجين (Roentgen) لقياس مقدار الشحنة المؤيّنة الناتجة لكل وحدة كتلة من العنصر المشع. واستُخدمت وحدة الرونتجين، ويرمز لها R، تخليداً لمكتشف الأشعة السينية فيلهلم كونارد رونتجين (Wilhelm Conard Roentgen). وواحد رونتجين يساوي 2.58×10^{-4} كولوم من الشحنة المؤيّنة لكل كيلوغرام من العنصر المشع.

ووحدة الإشعاع التي تقيس مقدار الطاقة الإشعاعية الممتصة، أو الجرعة الإشعاعية الممتصة، لكل غرام من المادة الماصّة تسمى الراد (rad). وواحد راد يساوي 100 إرج (erg) من الطاقة الإشعاعية الممتصّة بواسطة غرام واحد من المادة الماصة، أو $1\ rad = 0.01\ J/kg$ في نظام الوحدات SI. والراد هو وحدة الجرعة الإشعاعية في نظام الوحدات سم.غم.ث (cgs). والنظام cgs هو نظام وحدات مبني على السنتيمتر، والغرام، والثانية. ووحدة الجرعة الإشعاعية في نظام الوحدات SI هي الغراي (Gray) ويرمز لها Gy، حيث J/kg أو $1\ Gy = 100\ rad$.

يتم الاحتياج إلى مقياس للإشعاع لمراقبة التأثيرات الحيوية للإشعاع من مختلف أنواع الأشعة. ومقياس الإشعاع هو الجرعة المكافئة H. والجرعة المكافئة تساوي حاصل ضرب الجرعة الإشعاعية D في عامل الكفاءة QF، أي إن $H = D \times \mathrm{QF}$. وعامل الكفاءة هو عدد لابعدي يدل على مقدار الطاقة الناتجة في المادة أثناء اعتراضها لمرور الأشعة المعنية. يبيُن الجدول (2.4) عدداً من عوامل الكفاءة؛ وجُسَيمات آلفا في هذا الجدول تشير إلى نواة الهيليوم.

الجدول (2.4) عوامل الكفاءة النموذجية

الأشعة السينية، وأشعة غاما	1
نيوترونات حرارية (0.025 eV)	2
بروتونات ذات طاقة عالية	10
أيونات ثقيلة، بما في ذلك جُسَيمات آلفا	20

المصدر: موزّاي (Murray)، 2001، ص 213، جدول 1.16.

تقاس الجرعة المكافئة بالسيفرت (Sievert)، ويرمز لها Sv، إذا كانت الجرعة مقاسة بالغراي. وإذا كانت الجرعة مقاسة بالراد في نظام الوحدات cgs، فإن الجرعة المكافئة تقاس بالرِم (rem). السيفرت هو وحدة قياس الجرعة الإشعاعية في نظام الوحدات SI، أما الراد فهو وحدة القياس الأقدم في نظام الوحدات cgs. يذكر موزّاي (Murray) [2001، ص 214] بأن جرعة واحدة مفاجئة بمقدار 400 rem (أو 4 Sv) يمكن أن تكون قاتلة، بينما التعرّض السنوي النموذجي للإشعاعات الطبيعية أو الصناعية، مثل الأشعة الطبية، هو 360 mrem (أو 3.6 mSv).

النظائر

إن معظم العناصر لها نظائر مستقرة. على سبيل المثال، ذرة الكربون لها ستة بروتونات في نواتها. والكربون-12 هو نظير الكربون

بستة نيوترونات في نواته. والعدد 12 بعد الكربون هو مجموع الستة بروتونات والستة نيوترونات. ولا يخضع الكربون -12 لاضمحلال إشعاعي وبالتالي فهو مستقر. والنظير الهام للكربون، وهو الكربون-14، لديه ستة بروتونات وثمانية نيوترونات في نواته. وهو نظير الكربون المضمحل إشعاعياً. يتم التعبير عن أزمان الحياة للنظائر المشعة بدلالة عمر النصف (Half-Life). ويُعرَّف عمر النصف $t_{1/2}$ بأنه الزمن الذي تستغرقه نصف الكمية الأصلية من النظير للاضمحلال. وباستخدام التوزيع في المعادلة (4.4.2)، يمكننا التعبير عن عمر النصف كالتالي:

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \tau \ln 2 \qquad (4,4,5)$$

حيث τ متوسط العمر، أو متوسط زمن الحياة، للنواة المشعة. ويمكن تقدير عمر الأحفور أو الصخرة بدمج عمر النصف للنظير مع معرفة وفرته ووفرة نواتج اضمحلاله في صخرة مصدرية. وتقدير عمر الصخرة أو الأحفور باستخدام طرق الاضمحلال الإشعاعي يُسمّى تحديد العمر إشعاعياً.

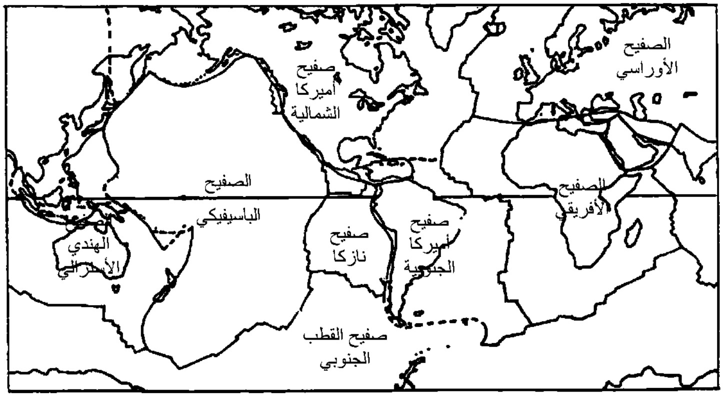
الظهور الشائع للكربون-14 في الكائنات الحية، بالإضافة إلى عمره النصفي الطويل نسبياً (حوالي 5600 سنة)، يجعل عملية اضمحلال الكربون-14 مفيدة لتحديد أعمار الأحافير. وهناك عملية اضمحلال أخرى هامة وهي اضمحلال اليوارنيوم. تضمحلّ نظائر اليورانيوم بانبعاث جُسَيمات آلفا وأعمارها النصفية تتراوح بين 4.5 إلى 13.9 بليون سنة. ونواتج اضمحلال اليورانيوم هي الرصاص والهيليوم. وظهور اليورانيوم في العديد من الصخور يجعل اضمحلال اليورانيوم وسيلة هامة لتقدير عمر الصخور. وتحديد عمر الصخور، بدوره، أساسي لتحديد عمر الأرض[7] وتطوير نظرية تكتونية الصفائح.

5.4 تكتونية الصفائح

في نظرية تكتونية الصفائح، يُنظر للقشرة الأرضية بأكملها وكأنها لغز عملاق دائم الحركة لترتيب قطع الصور المقطعة. وقطع اللغز هي الصفائح التكتونية. وتخبرنا حركة الصفائح تاريخ الليثوسفير. ويمكننا أن نبدأ لفهم تاريخ الليثوسفير بأن ندرك أولاً وجود علاقة ديناميكية بين الليثوسفير والأستينوسفير. يحتوي الليثوسفير على مجموعة من الصفائح الصلبة الطافية على الأستينوسفير شبه المنصهر. والصفائح التكتونية غالباً ما تقترن بكتل اليابسة القارية.

توفّر قياسات الأقمار الصناعية لمجال الجاذبية الأرضية صوراً لسطح الأرض خالية من كل من المحيطات والحياة. كما تبيّن صور الأقمار الصناعية بوضوح الحدود الفاصلة بين القارات، والسلاسل الجبلية الضخمة المرتفعة من أعماق المحيطات. وأشكال هذه الحدود دلالة على صفائح واسعة، كما هي مبيّنة في الشكل (5.4). ويبيّن هذا الشكل الصفائح المعروفة الأكبر فقط. ومعظم هذه الصفائح مقترنة بكتل اليابسة القارية.

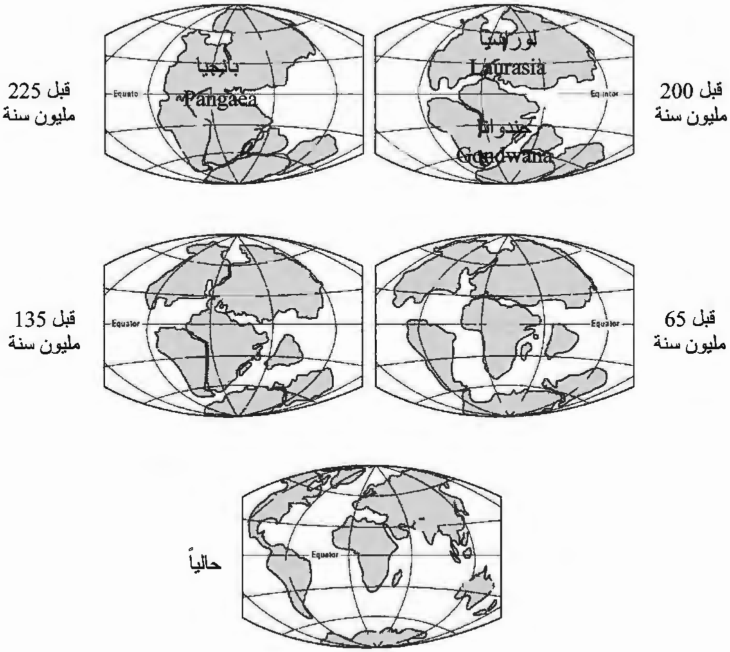
يمكن للمادة المنصهرة في الأستينوسفير أن تدخل الليثوسفير من خلال التصدعات الموجودة بين الصفائح. هذا الانتقال قد يكون بواسطة الانفجارات البركانية العنيفة، أو من خلال القذف التدريجي للحمم البازلتية عند الحدود الفاصلة بين الصفائح. أمثلة البراكين معروفة جداً. أما أمثلة القذف فليست بهذه المعرفة الجيدة، لأن المواقع الرئيسية لقذف الحمم البازلتية لا يمكن الوصول إليها حتى وقتنا الحاضر.



الشكل (5.4): الصفائح التكتونية

لقد اكتشف علماء البحار بأن سلسلة الجبال المحيطية مصادر للقذف البازلتي ولتمدد قيعان البحار. والصفائح القارية تُجبر على التحرك عندما تتمدد قيعان البحار. حركة الصفائح القارية تعرف بالزحزحة القارية، وقد اقترحت لأول مرة من قِبَل الجيوفيزيائي الألماني ألفريد فيغنر[8] (Alfred Wegener) في عام 1950. ومناطق من بعض الصفائح القارية المتحركة قد تصطدم مع بعضها. والتصادم بين صفيحتين يمكن أن يؤدّي إلى تشكّل سلاسل جبلية ضخمة، مثل جبال الهيمالايا. وبدلاً من ذلك، فإن التصادم قد يؤدي إلى انحراف إحدى الصفيحتين تحت الأخرى . والمادة الموجودة في المنطقة المنحرفة، أو منطقة الانْدساس، قد تجبَر على الهبوط إلى الأسفل خلال الموهو ثم إلى داخل الأسثينوسفير شبه المنصهر. وبهذا فإن مناطق الاندساس هي المواقع التي يتم فيها إعادة مادة القشرة إلى الوشاح. امتداد قاع البحر ومناطق الاندساس، سويّة، هما الآليتان الأساسيتان لنقل المادة بين القشرة والوشاح العلوي. والنظرية التي تصف حركة الصفائح الليثوسفيرية تُعرف بتكتونية الصفائح. وباستخدام تقنية تحديد العمر إشعاعياً والتشابه في التراكيب

الجيولوجية، يبيّن الشكل (6.4) رسماً توضيحياً لإعادة بناء تاريخ الخصائص الحجرية.



الشكل (6.4): حركة الصفائح التكتونية [موقع USGS على الشبكة العنكبوتية، 2001].

يبيّن الشكل (6.4) الحركة الافتراضية للصفائح التكتونية خلال الـ 225 مليون سنة الماضية. الخريطة الأولى في هذا الشكل تبدأ عندما كانت جميع أسطح كتل اليابسة ملتحمة في كتلة واحدة يابسة تسمى بانجيا (Pangaea). ويعتقد علماء الجيولوجيا بأن الكتلة اليابسة بانجيا تشكّلت عن طريق حركة الصفائح التكتونية، وأن الحركة المستمرة للصفائح أدت إلى انقسام الكتلة اليابسة الواحدة إلى السمات السطحية التي نراها اليوم. والقوى التي تنشأ في باطن

الأرض تؤدي إلى حركة الصفائح التكتونية. ومع ابتعاد الصفائح عن بعضها أو اصطدامها مع بعضها، فإنها قد تتسبب في أنشطة جيولوجية مثل الانفجارات البركانية، والزلازل، وتشكّل السلاسل الجبلية. وتُقدِّم حركة الصفيح تفسيراً للتوزيع الجغرافي للكائنات الحية حول العالم، وهي المسؤولة عن الكثير من عدم التجانس الجيولوجي الذي يمكن إيجاده في المكامن المحتوية على الهيدروكربون.

بالإضافة إلى الاصطدام العرضي من نيزك أو كويكب، فإن حركة ووضع الصفائح التكتونية قد وُضعت لها نظرية بأنها تسبب تغييرات بيئية شاملة. هذه التغييرات البيئية تتضمن تغيرات عالمية في مستوى سطح البحر وفي الغلاف الجوي. فالصفائح التكتونية يمكن أن تخفض من مستوى سطح البحر، مما يعمل على خلق فترة من التعرية والترسيب الواسعين اللذين يمكن أن يؤثرا في المحيط الحيوي «البيوسفير» (Biosphere). والنباتات والحيوانات قد تزدهر في وضع معيّن من الظروف، لكنها تنقرض بسهولة عندما تتغير تلك الظروف. واستناداً إلى هذه التغيرات، فقد وجد علماء الجيولوجيا بأن التاريخ الجيولوجي للأرض يمكن تقسيمه إلى فترات ملائمة.

يبيّن الجدول (3.4) نسخة مختصرة من جدول الأزمنة الجيولوجية بدءاً بتشكّل الأرض. الفترة الزمنية المشتملة بشكل أكبر هي الدهر، وهي مقسمة إلى حقب، والمقسمة بدورها إلى فترات. بداية كل عصر مقتبس من مرجعين [ليفن (Levin)، 1991؛ وريدلي (Ridley)، 1996] وتعتبر تقريبية لأنه لا يزال هناك عدم يقين في التسلسل الزمني الحقيقي للأرض.

الجدول (3.4) جدول مختصر للأزمنة الجيولوجية

الدهر	الحقبة	العصر	البداية التقريبية لكل عصر (م.س.ق.ع.ح)*
الحياة الظاهرة (Phanerozoic)	الحياة الحديثة (Cenozoic)	الرابع (Quaternary)	0.01
		الثالث (Tertiary)	5
	الحياة الوسطى (Mesozoic)	الطباشيري (Cretaceous)	144
		الجوراسي (Jurassic)	213-208
		الترياسي (Triassic)	248-245
	الحياة القديمة (Paleozoic)	البرمي (Permian)	286
		الكربوني (Carboniferous)	320
		الديفوني (Devonian)	408
		السيلوري (Silurian)	438
		الأردوفيسي (Ordovician)	505
		الكمبري (Cambrian)	590-570
ما قبل الكمبري (Precambrian)	طلائع الأحياء (Proterozoic)		2500
	الحقب الأركية	(Archaean)	3800
	الزمن الغابر (Hadean)		

*م.س.ق.ع.ح. = مليون سنة قبل العصر الحاضر

إن القشرة الصلبة للأرض ظهرت أولاً قبل أربعة بلايين سنة تقريباً في دهر ما قبل الكمبري (Precambrian). بعد ذلك بوقت قصير (جيولوجياً) ظهر الغلاف الجوي للأرض والمحيطات. بدأت الحياة تزدهر على الأرض خلال حقبة الحياة القديمة (Paleozoic Era).

وحقبة الحياة الوسطى (Mesozoic Era) كانت عصر الديناصورات. وأجزاء من القارة الضخمة بانجيا اكتسبت أشكال القارات الحديثة بحلول العصر الطباشيري (Cretaceous). ولم تبدأ الثدييات بالازدهار إلا مؤخراً نسبياً وذلك خلال حقبة الحياة الحديثة (Cenozoic Era).

ووفقاً لنظرية تكتونية الصفائح، فإن كتل اليابسة من الأرض كانت تتحرك لملايين السنين. وكما هو مبيّن في الشكل (6.4)، كانت كتل اليابسة عادة منفصلة عن بعضها بكتل ضخمة من المياه. وفي مرحلة معينة من التاريخ الجيولوجي، اندمجت كل القارات الحديثة لتشكل قارة واحدة ضخمة تسمى بانجيا. ظهرت القارة الضخمة بانجيا قبل حوالي 220 إلى 240 مليون سنة في العصر الترياسي (Triassic). وهذا العصر له أهمية خاصة في سياق نشأة الحياة. فقد وجد العلماء آثاراً للحياة في الأحافير التي عاشت قبل ثلاثة بلايين سنة. وظهور كتلة يابسة واحدة، قارة بانجيا، بعد ملايين السنين من نشأة الحياة يوحي بأن الحياة ربما نشأت في منطقة واحدة على الأرض، وبعد ذلك انتشرت على جميع القارات من دون الحاجة إلى عبور الكتل المائية الضخمة. وفي الحقيقة، فقد وُجد بأن الدليل الأحفوري يبيّن وجود أشكال من الحياة المتقدمة نسبياً مثل الزواحف شبه الثديية والديناصورات في الوقت الذي وُجدت فيه قارة بانجيا.

وواضح بأن قارة بانجيا لم تحتفظ بوحدتها. فالقذائف البازلتية من الوشاح أدت إلى تفكك صفائح قارة بانجيا. وتدريجياً بدأت قارة بانجيا بالانقسام. جزر هاواي (Hawaii) هي مثال جيد للخاصّية الديناميكية لنظرية تكتونية الصفائح[9].

البقعة الساخنة لهاواي

إن جبل كيلاويا (Kilauea) في «الجزيرة الكبرى» لهاواي هو بركان نشيط يقع على بقعة ساخنة في الوشاح الأرضي (الشكل

(7.4)). ويعتقد العلماء بأن الصهير (Magma)، أو الصخر البركاني المنصهر، يتدفق من الوشاح إلى الأعلى من خلال الفجوات البركانية. يصبح الصهير حمماً بركانية عندما يتدفق على القشرة الأرضية. وعندما يلامس الصهير مياه المحيطات فإنه يبرد ويتجمّد. والنتيجة هي تشكّل الجبال، وإذا ارتفع الجبل بما فيه الكفاية أعلى قاع البحر فإنه يصبح جزيرة.

الشكل (7.4): البقع الساخنة لهاواي [موقع USGS على الشبكة العنكبوتية، 2001].

لقد عملت البقعة الساخنة في الوشاح أسفل جبل كيلاويا على خلق أعلى الجبال على وجه الأرض عند قياسها من قاع البحر، كما عملت على خلق سلسلة جزر الهاواي، وهي سلسلة من الجزر التي تمتد من الجزيرة المرجانية كيور (Kure) غرب الجزر الوسطى إلى هاواي. ومعظم هذه الجزر البركانية قد تعرضت لعوامل التعرية وأصبحت جزراً مرجانية. والبقعة الساخنة الآن في مرحلة خلق جزيرة أخرى من جزر هاواي، وقد سميت لويهي (Loihi). ولويهي هو بركان في قاع البحر يقع في الغرب من هاواي، ويتوقع أن ينمو ويرتفع فوق سطح المحيط الهادي في بضعة آلاف من السنين. كيف

يمكن لبقعة ساخنة واحدة في الوشاح أن تنجز كل هذا؟ نظرية تكتونية الصفائح تستطيع أن تقدم لنا الإجابة.

إن جزر هاواي هي جزء من القشرة الأرضية المسماة بالصفيح الباسيفيكي. وتخبرنا نظرية تكتونية الصفائح بأن الصفائح القشرية قد تحركت بالنسبة إلى الوشاح لملايين من السنين. وحافة هاواي، بما في ذلك جزر هاواي، تكوّنت بانتقال الصفيح الباسيفيكي على بقعة ساخنة مستقرة نسبياً في الوشاح الذي يثور الآن من خلال بركان كيلاويا. وتوفر تقنية تحديد العمر إشعاعياً دليلاً يدعم هذه الفكرة لأن البيانات تبيّن بأن عمر الجزر يزداد مع الانتقال نحو الغرب من هاواي على طول حافة هاواي إلى الجزر الوسطى.

تشكّل الصخور القشرية

ولّدت حركة الصفائح التكتونية عبر سطح الأرض قوى يمكن أن تؤدي إلى تشكّل الصخور. ويمكننا أن نعتبر عملية تشكّل الصخور كدورة صخرية. تبدأ الدورة الصخرية مع برودة الصهير المنصهر يتبعها عملية تصلب إلى صخور. عادة، يتم تشكّل الصخور الجديدة عند الحدود الفاصلة بين الصفائح، كما يمكن أيضاً أن يتم على البقع الساخنة ضمن الوشاح الأرضي، مثلما حدث في جزر هاواي. عندما تصطدم الصفائح مع بعضها، فإن الضغط والحرارة يمكن أن يؤدّيا إلى انصهار جزء من الصفيح، وتنتج عن ذلك صخور منصهرة تندفع نحو سطح الأرض. وبعد أن تبرد، تصبح الصخور التي على السطح خاضعة للظواهر الجوية.

وتتسبّب العوامل الفيزيائية والكيميائية في تكسر الصخور المكشوفة إلى جُسَيمات أصغر فأصغر. تقوم الرياح والمياه بنقل هذه الجُسَيمات من مواقعها الأصلية في عملية تسمى التعرية (Erosion).

تصبح هذه الجُسَيمات أنعم فأنعم باستمرار عند اصطدامها بأجسام أخرى أثناء عملية الانتقال. ويترسب الجُسَيم مع الجُسَيمات الأخرى عندما تتبدد طاقة الرياح أو المياه إلى نقطة حيث تكون عندها الطاقة غير كافية لنقل الجُسَيم. ويصبح تراكم الجُسَيمات أسمك فأسمك.

على مدى ملايين السنين، تتحرك الصفائح التكتونية ببطء نحو الأعلى ونحو الأسفل بالنسبة إلى مستوى سطح البحر، مما يؤدّي إلى التعرية والترسيب بشكل متناوب. عملية الترسيب يمكن أن تتراوح ما بين آلاف الأقدام من الرواسب في منطقة ما إلى لا شيء على الإطلاق. وعملية التعرية يمكن أن تؤدي إلى نحت الوديان، أو تسوية الجبال الشاهقة، أو إزالة جميع آثار التشكل التي كانت في يوم ما بسماكة آلاف الأقدام. ويمكن للضغط ودرجة الحرارة العاليين أن يتسبّبا في تغيير خصائص الصخور في عملية تسمّى تحوّل الصخور (Metamorphism). وقد تصبح الجُسَيمات مندمجة مع بعضها لتكوين أجسام أكبر بكثير. وبعد مقدار معيّن من الزمن، والضغط، والحرارة، ستنصهر الصخور وتبدأ الدورة الصخرية من جديد.

استناداً إلى هذه الدورة الصخرية، يعرّف علماء الجيولوجيا ثلاثة أنواع أساسية من الصخور: النارية، والرسوبية، والمتحوّلة. برودة المادة المنصهرة المسماة بالصهير تؤدي إلى تشكّل الصخور النارية. وتتكون الصخور الرسوبية من حُبَيبات معدنية. والحُبَيبات المعدنية هي بلورات غير عضوية بتركيب كيميائي معيّن. تظهر الحُبَيبات المعدنية طبيعياً. ويمكن تجويتها (Weathered)، ونقلها، وترسيبها في مواقع تراكمها. وإذا تراكمت الحُبَيبات المعدنية وتماسكت مع بعضها، فإنها تشكّل الصخور الرسوبية. وتتكون الصخور المتحوّلة من صخور تكون قد غيّرت نسيجها الأصلي أو معدنها أو تركيبها الكيميائي بواسطة الحرارة، أو الضغط، أو النشاط الكيميائي.

والصخور الرسوبية هي عادة محل الاهتمام الأكبر للمتخصّصين العاملين في تحديد خصائص المكامن الهامة تجارياً مثل المكامن البترولية.

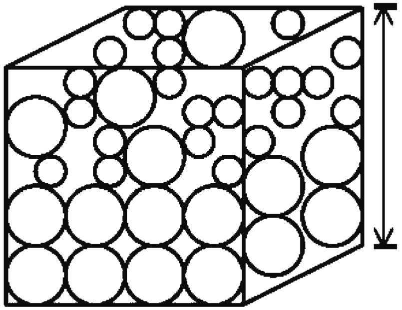
تعمل عمليات التجوية (Weathering) على سطح الأرض على خلق الحُبَيبات التي تشكّل الصخور الرسوبية. تعمل التجوية على خلق جُسَيمات يمكن أن تكون عملياً بأيّ حجم، أو شكل، أو تركيب. ويمكن للنهر الجليدي تكوين ونقل أجسام بحجم المنزل، كما يمكن للرياح الصحراوية تكوين طبقة منتظمة من الرمال الناعمة جداً. والجُسَيمات، التي تعرف أيضاً بالرسوبيات يتم نقلها إلى مواقع الترسيب عادة بعمليات مائية. وفي بعض الأحيان يتم نقل الجُسَيمات إلى مواقع بعيدة جداً. في هذه الحالة، تتبقى فقط الجُسَيمات المتينة جداً من عملية النقل. حُبَيبات الرمال تتدحرج وترتطم على طول مسار النقل. والحُبَيبات التي بدأت بصخور غليظة ذات زوايا تصبح ببطء أصغر حجماً ومدوّرة. حُبَيبات الكوارتز، على سبيل المثال، معادن صلبة نسبياً. هذه الحُبَيبات يمكنها أن تقاوم العديد من دورات الترسيب والتعرية. وهذا يجعل الحُبَيبات مدوّرة تماماً. والمعادن التي تتركب منها الصخور الرسوبية تعتمد على كثير من العوامل. مصدر هذه المعادن، ومعدل تكسر المعدن، وبيئة الترسيب هي من أهم العوامل التي يجب أخذها في الاعتبار لتحديد خصائص البيئة الجيولوجية.

6.4 الموائع في الأوساط المسامية

إن المكامن الجوفية في باطن الأرض هي أمثلة على الأوساط المسامية[10]. الوسط المسامي هو الوسط الذي يحتوي على حُبَيبات صخرية وفراغات مسامية. يبيّن الشكل (8.4) رسماً توضيحياً لكتلة

صخرية بحُبَيبات من الرمل تملأ الكتلة. الحجم الكتلي (Bulk Volume) هو حجم الكتلة وتشمل كلاًّ من حجم الحُبَيبات وحجم الفراغ، أو الحجم المسامي. والحجم الكتلي V_B لوسط مسامي هو المساحة A في المستوى الأفقي مضروبة في إجمالي السماكة H، أي إن:

$$V_{\mathrm{B}} = AH \tag{4.6.1}$$



الشكل (8.4): الوسط المسامي

الحجم غير المشغول بحُبَيبات الرمل هو الفراغ المسامي المتاح لشغله بواسطة موائع مثل النفط، والغاز، والماء. الغاز والسائل المحتجزان في الفراغات المسامية للصخور تحتوي عادة على خليط من الذرات والجُزَيئات.

تُعرَّف المسامية ϕ بأنها النسبة بين الحجم المسامي والحجم الكتلي. والحجم المسامي V_P هو باقي الحجم عند طرح حجم الحُبَيبات V_G من الحجم الكتلي، وبالتالي فإن:

$$\phi = \frac{V_{\mathrm{P}}}{V_{\mathrm{B}}} = \frac{V_{\mathrm{B}} - V_{\mathrm{G}}}{V_{\mathrm{B}}} \tag{4.6.2}$$

هناك أنواع مختلفة من المسامية، إلا أن المسامية يمكن اعتبارها ببساطة بأنها الفراغ الشاغر في الصخرة. بعد إعادة الترتيب، نجد من

المعادلة (4.6.2) أن الحجم المسامي هو حاصل ضرب الحجم الكتلي في المسامية، أي إن:

$$V_P = \phi V_B \tag{4.6.3}$$

عندما تترسب الصخور الرسوبية، فإن الفراغات المسامية تُملأ بالماء. ومسامات الصخور يمكن ملؤها في وقت لاحق بموائع هامة تجارياً بدءاً من المياه الصالحة للشرب إلى النفط والغاز. بشكل عام، اهتمامنا هو بالفراغات الشاغرة المتصلة بفراغات شاغرة أخرى . هذه الفراغات المسامية المتصلة مع بعضها تشكّل قنوات لتدفق المائع. إن النفاذية (Permeability) هي مقياس لاتصالية الفراغات المسامية. يعتبر الصخر غير منفِّذ إذا لم تكن هناك اتصالية بين فراغاته المسامية. والصخور الرسوبية مثل الحجر الرملي تميل إلى أن تكون منفذّة عند مقارنتها بصخور الطَفَل غير المنفذة نسبياً.

إن التعريفين السابقين للحجم الكتلي والحجم المسامي هما مقياسان للحجم الإجمالي في النظام. ولتقدير الحجم الإجمالي في النظام الهام تجارياً، فإن الحجم الإجمالي يجب تعديله من خلال إدخال مفهوم صافي السماكة.

إن صافي السماكة h هو سماكة التشكُّل الهام تجارياً. على سبيل المثال، إذا كان إجمالي السماكة يحتوي على 5 m من صخر الطَفَل غير المنفِّذ و15 m من الحجر الرملي المنفذ، فإن إجمالي السماكة هو 20 m وصافي السماكة هو 15 m . وإذا كان الحجر الرملي المنفِّذ غير مرتبط كليّا ببئر الإنتاج، فإن قيمة صافي السماكة ستنخفض بشكل أكبر.

النسبة بين الصافي إلى الإجمالي η_{NTG} هي النسبة بين صافي السماكة h إلى إجمالي السماكة H، أي إن:

$$\eta_{NTG} = h/H, \quad 0 \le \eta_{NTG} \le 1 \tag{4.6.4}$$

عدم التساوي هنا يُبرز حقيقة أن صافي السماكة دائماً أقل من أو يساوي إجمالي السمك. وحجم صافي العطاء (Net Pay)، أو النطاق الهام تجارياً، هو حاصل ضرب الحجم المسامي في النسبة بين الصافي إلى الإجمالي. أي إن:

$$V_{\text{pay}} = \eta_{\text{NTG}} V_{\text{P}} = \eta_{\text{NTG}} HA\phi = hA\phi \tag{4.6.5}$$

التشبّع S_l للطور l هو الجزء من حجم الفراغ المسامي المشغول بالطور l. النفط، والماء، والغاز هي أطوار المائع الأكثر شيوعاً. والحجم V_l للطور l في فترة العطاء (Pay Interval) هو حاصل ضرب حجم صافي العطاء في تشبع الطور. أي إن:

$$V_\ell = S_\ell V_{\text{pay}} = S_\ell hA\phi \tag{4.6.6}$$

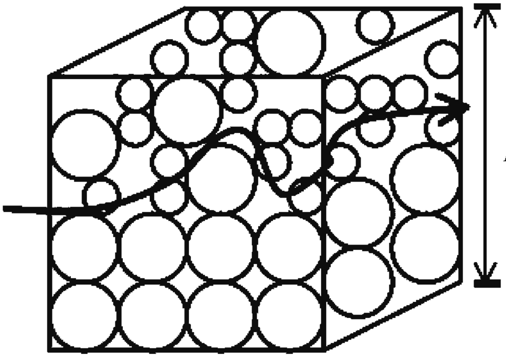
مجموع التشبعات في فترة العطاء يجب أن تساوي 1. فإذا كان للنظام عدد N من الأطوار، فإن القيد الإلزامي للتشبع هو:

$$1 = \sum_{\ell=1}^{N_\ell} S_\ell \tag{4.6.7}$$

لنظام النفط ـ الماء ـ الغاز، القيد الإلزامي للتشبع هو $S_o + S_{\text{w}} + S_{\text{g}} = 1$، حيث الحروف السفلية {g,w,o} تشير إلى النفط، والماء، والغاز على التوالي.

عندما يتم إنتاج الموائع من المكمن، فإنها تمر عبر صخرة المكمن من مكان ذات طاقة أعلى إلى مكان ذات طاقة أقل. حفرة البئر المنتجة هي عند نقطة طاقة أقل. المسار الذي يسلكه المائع قد يكون مستقيماً أو ملتوياً جداً. خاصية الصخرة التي تقيس طول المسار من نقطة واحدة A إلى نقطة أخرى B بالنسبة إلى الخط المستقيم تسمّى «التعرّج». إذا كان المسار خطاً مستقيماً، والذي يمكن أن يحدث بانكسار، فإن التعرّج يساوي 1. في معظم

الحالات، مسار التدفق بين النقطتين A وB أطول من الخط المستقيم، لدرجة أن التعرج يصبح أكبر من 1. يبيّن الشكل (9.4) مفهوم التعرج.



الشكل (9.4): التعرج

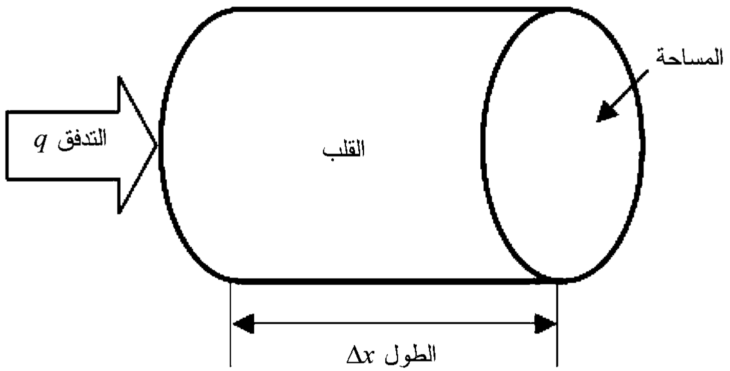
قانون دارسي

تسمّى المعادلة الأساسية التي تصف تدفق المائع في الأوساط المسامية قانون دارسي (Darcy). ومعادلة دارسي المستخدمة لحساب معدل التدفق الحجمي q للتدفق الخطي الأفقي الأحادي الطور هي كالتالي:

$$q = -0.001127 \frac{KA_{\perp}}{\mu} \frac{\Delta P}{\Delta x} \qquad (4.6.8)$$

يوضح الشكل (10.4) المتغيرات الموجودة في قانون دارسي لقلب أسطواني من الصخر. حركة مائع أحادي الطور خلال وسط مسامي يعتمد على مساحة المقطع $A_{\perp}$ العمودية على اتجاه تدفق المائع، والفرق في الضغط Δp خلال الطول Δ_x من مسار التدفق، واللزوجة μ للمائع المتدفق. الإشارة السالبة تدل على أن اتجاه التدفق

عكس اتجاه تزايد الضغط؛ حيث يتدفق المائع من الضغط العالي إلى الضغط المنخفض في النظام الأفقي (الخالي من الجاذبية). وثابت التناسب K في المعادلة السابقة (4.6.8) يُسمّى النفاذية.



الشكل (10.4): قانون دارسي

وحدات المتغيرات الفيزيائية تحدد قيمة الثابت (0.001127) في المعادلة (4.6.8). والثابت 0.001127 يتوافق مع المتغيرات المذكورة في وحدات حقل النفط التالية:

q = معدل التدفق الحجمي (bbl/day)

K = النفاذية (md)

A = مساحة المقطع (ft^2)

P = الضغط (psi)

μ = لزوجة المائع (cp)

Δx = الطول (ft)

يبيّن الجدول (4.4) وحدات حقل النفط للمتغيرات الواردة في المعادلة (4.6.8) في نظام الوحدات SI.

الجدول (4.4) وحدات حقل النفط في قانون دارسي

المتغير	وحدة حقل النفط	معامل التحويل
معدل التدفق	برميل لكل يوم = bbl/day	1 bbl/day = 0.1589 m^3/day
النفاذية	ميلي دارسي = md	1 md = 0.986923×10^{-15} m^2
المساحة	قدم مربع = ft^2	1 ft^2 = 0.0929 m^2
الضغط	قوة-رطل لكل بوصة مربعة = psi	1 psi = 6894.8 Pa
لزوجة المائع	سنتي بواز = cp	1 cp = 0.001 Pa.s
الطول	قدم = ft	1 ft = 0.3048 m

بإعادة ترتيب المعادلة (4.6.8) وإجراء تحليل بُعدي، نجد أن النفاذية لها أبعاد L^2 (المساحة) حيث L هي وحدة الطول. أي إن:

$$K = \frac{\text{المعدل} \times \text{اللزوجة} \times \text{الطول}}{\text{المساحة} \times \text{الضغط}} = \frac{L\left(\frac{\text{القوة} \times \text{الزمن}}{L^2}\right)\left(\frac{L^3}{\text{الزمن}}\right)}{\left(\frac{\text{القوة}}{L^2}\right)L^2} = L^2 \qquad (4.6.9)$$

إن وحدة المساحة (L^2) فيزيائياً لها علاقة بمساحة مقطع أعناق المسامات في الصخور. وعنق المسام هو الفتحة التي تصل بين مسامين. ويعتمد حجم عنق المسام على حجم الحُبَيبات وتوزيعها. لأيّ توزيع معيّن للحُبَيبات ، فإن مساحة مقطع عنق المسام ستزداد مع زيادة حجم الحُبَيبات . الأعناق الكبيرة نسبياً للحُبَيبات تدل ضمناً على قيم كبرى نسبياً للمساحة L^2 وتتوافق مع القيم الكبرى نسبياً للنفاذية. وتتراوح النفاذية عادة ما بين 1 md (تساوي 1.0×10^{-15} m^2) إلى 1 Darcy (تساوي 1000 md أو 1.0×10^{-12} m^2) لحقول النفط والغاز الناجحة تجارياً.

يبيّن قانون دارسي أن هناك علاقة خطية بين معدل التدفق والفرق في الضغط. وتدرُّج الضغط من نقطة حقن المائع إلى نقطة سحب المائع يمكن إيجاده بإعادة ترتيب المعادلة (4.6.8) كالتالي:

$$\frac{\Delta P}{\Delta x} = -\left(\frac{q}{0.001127 A_{\perp}}\right)\frac{\mu}{K} \qquad (4.6.10)$$

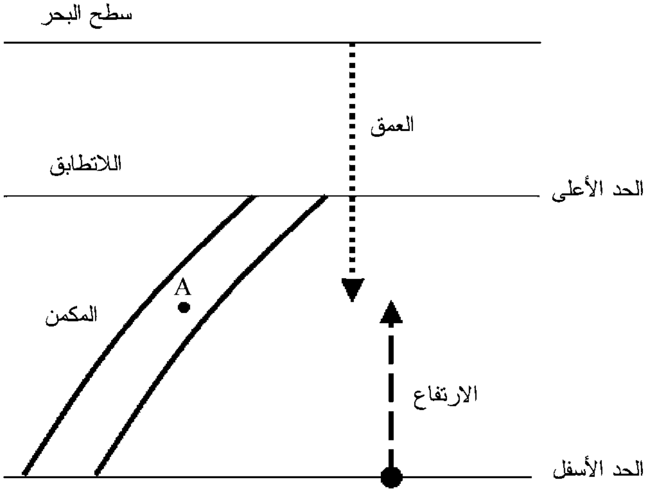
إن السرعة السطحية u (Superficial Velocity) هي معدل التدفق الحجمي q مقسوماً على مساحة المقطع A العمودية على اتجاه التدفق [بير (Bear)، 1972؛ لايك (Lake)، 1989]، أي إن $A_{\perp}$ بالوحدات المناسبة. والسرعة البينية v (Interstitial Velocity)، أو «الأمامية»، للمائع خلال الصخرة المسامية هي السرعة الفعلية لعنصر المائع عند تحركه خلال الفراغات المسامية المتعرجة. والسرعة البينية v تساوي السرعة السطحية u مقسومة على المسامية ϕ، أي إن $v=u/\phi=q/\phi A\perp$. ولأن المسامية كسر ما بين 0 و1، فإن السرعة النسبية تكون عادة أكبر من السرعة السطحية.

7.4 شروط الاتزان في وجود الجاذبية

قدمنا في الفصل الثالث مسألة تحديد شروط الاتزان لخليط من المائع في غياب الجاذبية. سنقوم هنا بتوسيع المناقشة لمسألة حساب التوزيع العمودي لمكونات خليط المائع في وجود الجاذبية. هذا التوزيع يعتبر ذا أهمية في دراسة غازات الغلاف الجوي، وعمود من المائع في خزان أو أنبوب عمودي، وتدفّق المائع في الوسط المسامي. وسيكون تركيزنا هنا على التدرّج في المكوّنات المتعلقة بالمائع في الوسط المسامي. مرة أخرى ، سنعتبر هذه المسألة في النظام المغلق وبعد ذلك السماح بانتقال الكتلة من خلال توسيع المسألة إلى النظام المفتوح.

الأنظمة المغلقة

لنفترض مكوِّناً واحداً كتلته m يعاني من تغير في الحجم وتغير في الموضع بالنسبة إلى مجال الجاذبية بعجلة ثابتة قدرها g. يوضح الشكل (11.4) نظام الصخرة ـ المائع. يُسمّى نظام الصخرة ـ المائع مكمناً. هذا المكمن محاط من الأعلى والأسفل بصخور غير منفِّذة. وهذه الصخور المحيطة تشكّل مانعاً محكماً يُسمّى اللاتطابق (Unconformity) في هذا المثال. يمكننا تحديد موقع النقطة A للمكمن في الاتجاه العمودي بقياس الارتفاع من الحد الأسفل إلى النقطة A، أو بقياس العمق من سطح البحر. يزداد قياس الارتفاع عند تحركنا نحو الأعلى في المكمن، بينما يزداد قياس العمق عند تحركنا نحو الأسفل في المكمن. وكلا التصوّرين مقبول طالما وأنه واضح أيّ من القياسين سيتم إجراؤه.



الشكل (11.4): نظام الصخرة ــ المائع

سنختار قياس الارتفاع بحيث إن الشغل المبذول لرفع m من الارتفاع z إلى ارتفاع أعلى $z+dz$ خلال المسافة الصغيرة جداً dz هو $(mg)dz$. والشغل المبذول بواسطة النظام هو:

$$dW = PdV - mgdz \tag{4.7.1}$$

بهذا، يصبح القانون الأول للديناميكا الحرارية على النحو التالي:

$$dU = PdV - mgdz \tag{4.7.2}$$

والارتفاع z الآن متضمن في العلاقة الدالية للطاقة الداخلية، أي إن:

$$U = U(S,V,z) \tag{4.7.3}$$

الأنظمة المفتوحة

التغير في الطاقة الداخلية للنظام المفتوح متعدد المكوّنات في غياب الجاذبية معطى بالمعادلة (3.6.11). سنقوم هنا بكتابتها على الصورة التالية:

$$dU_0 = T\,dS - P\,dV + \sum_{i=1}^{N_c} \mu_i dn_i\,;\ \mu_i = \left(\frac{\partial U_0}{\partial n_i}\right)_{S,V,n_j} \tag{4.7.4}$$

في وجود الجاذبية، سنقوم بإضافة عامل طاقة الوضع mgz للحصول على :

$$dU = dU_0 + d(mgz) = T\,dS - P\,dV + \sum_{i=1}^{N_c} \mu_i dn_i + d\left[\left(\sum_{i=1}^{N_c} M_i n_i\right) gz\right] \tag{4.7.5}$$

حيث الكتلة m للنظام هي:

$$m = \sum_{i=1}^{N_c} M_i n_i \tag{4.7.6}$$

و M_i هي الوزن الجزيئي للمكوّن i. بفك تفاضل حد الجاذبية وإعادة ترتيب المعادلة (5.7.4) نحصل على:

$$dU = T\,dS - P\,dV + \sum_{i=1}^{N_c} (\mu_i + M_i gz) dn_i + mg\,dz \qquad (4.7.7)$$

نقوم بتقدير معايير الاتزان أولاً بحساب التفاضل لطاقة جيبس الحرة. وبتذكر أن S وV ثابتان في طاقة جيبس الحرة نحصل على :

$$dG = dU - S\,dT + P\,dV = -S\,dT + P\,dV + \sum_{i=1}^{N_c} (\mu_i + M_i gz) dn_i + mgdz \qquad (4.7.8)$$

يتم إيجاد معايير الاتزان بفرض أن $dG = 0$ خاضع للقيدين التاليين :

1 ـ أن العملية هي أيزوثرمية (أو قريبة جداً من ذلك).

2 ـ أن النظام معزول $(dn_i = 0 \;\; \forall i = 1, ..., N_c)$

يذكر القيد الأول بأن النظام يصل إلى حالة الاتزان في بيئة درجة حرارة ثابتة. وتتخلى الإنتروبيا عن dG بسبب الافتراض الأيزوثرمي $(dT = 0)$. ويتطلب القيد الثاني أن تكون عدد الجُزَيئات ثابتة. وقيد النظام المعزول يتضمن بأن يكون معامل كل حد في dn_i ثابتاً. أي إن:

$$m_i + M_i gz = \text{ثابت} \quad \forall i = 1, ..., N_c \qquad (4.7.9)$$

بدمج المعادلة (4.7.9) مع بقية الحدود في dG نحصل على المعيار الإضافي الآتي:

$$V\,dP + mg\,dz = 0 \qquad (4.7.10)$$

بحل هذه المعادلة من أجل dP نحصل على :

$$dP = -\frac{m}{V} g\,dz = -\rho\, g\,dz \qquad (4.7.11)$$

حيث ρ الكثافة الكتلية. والفرق في الضغط بين الارتفاعين z_1 وz_2 هو:

$$\int_{P_1}^{P_2} dP = P_2 - P_1 = \int_{z_1}^{z_2} (-\rho g)dz = -\rho g(z_2 - z_1) \qquad (4.7.12)$$

أو:

$$P_2 = P_1 - \rho g(z_2 - z_1) \qquad (4.7.13)$$

إذا كان الارتفاع z_2 أكبر من الارتفاع z_1، فإن الضغط P_2 عند الارتفاع z_2 أقل من الضغط P_1 عند الارتفاع z_1. وهذا يوضح مشاهدة هي بشكل عام حقيقية: يزداد الضغط مع العمق كلما تعمقنا في الحفر في القشرة الأرضية حيث تكون عجلة الجاذبية الأرضية g تقريباً ثابتة.

يمكن التعبير عن المعادلة (4.7.9) بشكل مختلف للعملية الأيزوثرمية على النحو التالي:

$$dm_i + M_i gz = 0 \ \ \forall i = 1,...,N_c \qquad (4.7.14)$$

تكامل المعادلة (4.7.14) بين الارتفاعين z_1 وz_2 هو:

$$\int_{\mu_{i1}}^{\mu_{i2}} dm_i = -M_i g \int_{z_1}^{z_2} dz \qquad (4.7.15)$$

وبإجراء التكامل نحصل على النتيجة الآتية:

$$\mu_{i2} - \mu_{i1} = -M_i g(z_2 - z_1) \qquad (4.7.16)$$

تبيّن المعادلة (4.7.16) بأن الجهد الكيميائي لكل مكوّن في المائع يتغير مع الارتفاع. هذا التغير يمثل التدرج في المكونات.

8.4 الطاقة الجيوحرارية

أشرنا سابقاً إلى أن باطن الأرض مقسم إلى لب داخلي بلوري، ولب خارجي منصهر، ووشاح، وقشرة. والبازلت، الصخر البركاني الأسود، يوجد في حالة شبه منصهرة عند سطح الوشاح أسفل القشرة مباشرة. والحفر في القشرة الأرضية قد بيّن بأن درجة حرارة القشرة

تميل إلى الزيادة خطياً مع العمق. باطن الأرض أكثر سخونة من القشرة. ومصدر الطاقة الحرارية هو اضمحلال إشعاعي، وتعمل القشرة الأرضية كعازل حراري لمنع الحرارة من التسرب في الفضاء.

يمكن الحصول على الطاقة الجيوحرارية[11] من التدرج في درجات الحرارة بين الأرضية الضحلة وسطح الأرض، والمياه الساخنة تحت السطحية، والصخور الساخنة الموجودة تحت سطح الأرض بعدة كيلومترات، والصهير. الصهير هو الصخر المنصهر في الوشاح والقشرة ويتم تسخينها بواسطة المكامن الحرارية الضخمة في باطن الأرض. في بعض أجزاء القشرة الأرضية، يكون الصهير قريباً جداً من سطح الأرض ليقوم بتسخين الصخور والمياه الموجودة في الفراغات المسامية للصخور. الطاقة الحرارية المكتسبة من المصادر الجيولوجية تسمّى «الطاقة الجيوحرارية» (Geothermal Energy). الصهير، والماء الساخن، والبخار هي ناقلات الطاقة.

تعتمد الطاقة المنقولة إلى سطح الأرض من المكمن الجيوحراري على السعة الحرارية وطور المائع الناتج. ونوضح هذا الاعتماد بافتراض مثال. نفترض أن الفراغات المسامية للمكمن الجيوحراري مشغول بمياه ساخنة. إذا كانت درجة حرارة الماء الناتج هي عند درجة حرارة المكمن الجيوحراري T_{res}، فإن كمية الحرارة الناتجة مع الماء الساخن هي:

$$\Delta H_w = m_w c_w \Delta T \qquad (4.8.1)$$

حيث T الفرق في درجة الحرارة $(T_{res} - T_{ref})$، وT_{ref} درجة الحرارة المرجعية مثل درجة حرارة سطح الأرض، وm_w كتلة الماء الناتج، وc_w السعة الحرارية النوعية للماء. كتلة الماء الناتج يمكن التعبير عنها بدلالة معدل التدفق الحجمي q_w، والفترة الزمنية للتدفق Δt، وكثافة الماء P_w، أي إن:

$$m_w = \rho_w q_w \Delta t \tag{4.8.2}$$

بتعويض المعادلة (4.8.2) في المعادلة (4.8.1) نحصل على :

$$\Delta H_w = (\rho_w q_w \Delta t) c_w \Delta T = (\rho_w q_w \Delta t) c_w (T_{res} - T_{ref}) \tag{4.8.3}$$

كمية الحرارة الناتجة من المكمن الجيوحراري خلال الزمن Δt هي القدرة الجيوحرارية P_{geo}، أي إن:

$$P_{geo} = \frac{\Delta H_w}{\Delta t} = (\rho_w q_w) c_w \Delta T = \rho_w q_w c_w (T_{res} - T_{ref}) \tag{4.8.4}$$

القدرة الكهربائية P_{out} التي يمكن توليدها من القدرة الجيوحرارية تعتمد على الكفاءة η_{geo} لتحويل القدرة الجيوحرارية إلى قدرة كهربائية، أي إن:

$$P_{out} = \eta_{geo} P_{geo} = \eta_{geo} \rho_w q_w c_w (T_{res} - T_{ref}) \tag{4.8.5}$$

إذا كان البخار هو الناتج بدلاً عن الماء الساخن أو بالإضافة إلى الماء الساخن، فإن كمية الحرارة الناتجة يجب أن تشتمل على الحرارة الكامنة للتبخير.

تقع بعض منشآت الإنتاج الجيوحراري الكبرى في العالم عند فوّارات المياه الساخنة في كاليفورنيا، وفي أيسلندا. هذه المناطق محددة بقربها من مصادر الطاقة الجيوحرارية. وتقنيات تحويل الطاقة الجيوحرارية إلى حرارة وكهرباء مفيدتين يمكن تصنيفها إلى المضخات الحرارية الجيوحرارية، وتطبيقات الاستخدام المباشر، ومحطات الطاقة الكهربائية الجيوحرارية[3]. سيتم مناقشة كل من هذه التقنيات في الأقسام التالية.

المضخات الحرارية الجيوحرارية

تستخدم المضخة الحرارية الجيوحرارية الطاقة الموجودة بالقرب من سطح الأرض لتدفئة وتبريد المباني. درجة حرارة الأمتار الثلاثة

العليا للقشرة الأرضية تبقى في مدى ثابت نسبياً يتراوح بين 10° C و16° C. المضخة الحرارية الجيوحرارية للمباني تتكون من قنوات يتم عملها في المبنى متصلة خلال مبادل حراري بأنابيب مدفونة في أرضية ضحلة مجاورة. يتم تدفئة المبنى في أثناء الشتاء بضخ الماء خلال المضخة الحرارية الجيوحرارية. يسخن الماء عند مروره خلال الأنابيب المدفونة في الأرض. يتم نقل الحرارة الناتجة إلى المبادل الحراري حيث تُستخدَم لتسخين الهواء في القنوات المعمولة في المبنى . في أثناء الصيف، يتم عكس اتجاه تدفق الحرارة. يقوم المبادل الحراري باستخدام الحرارة الناتجة من الهواء الساخن في المبنى لتسخين الماء الذي بدوره ينقل الحرارة خلال منظومة الأنابيب إلى الأرضية الضحلة الباردة. في الشتاء، يتم إضافة الحرارة إلى المبنى من جوف الأرض، وفي الصيف تتم إزالة الحرارة من المبنى.

تطبيقات الاستخدام المباشر

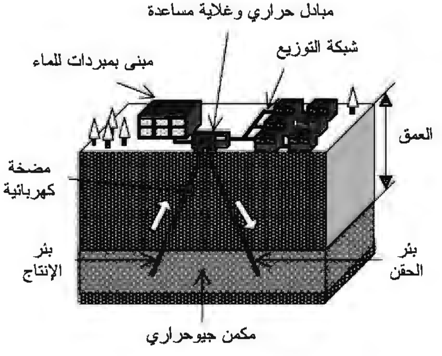
تستخدم تطبيقات الاستخدام المباشر للطاقة الجيوحرارية الحرارة من المصدر الجيوحراري مباشرة في التطبيق. وهذا يعني أن الماء الساخن من المكمن الجيوحراري يُستخدم من دون أيّ وسيط مثل المبادل الحراري في المضخة الجيوحرارية. ويمكن نقل الماء الساخن من المكمن الجيوحراري مباشرة بضخه في أنابيب إلى المنشأة واستخدامه كمصدر للتدفئة. ومن تطبيقات الاستخدام المباشر في الطقس البارد في المدينة التي تستطيع الوصول إلى مكمن جيوحراري هو ضخ الماء الساخن في أنابيب من المكمن الجيوحراري الموجود تحت الطرقات وأرصفة المشاة لإذابة الثلوج.

يتم نقل المعادن الموجودة في المياه الجيوحرارية مع الماء الساخن في منظومة الأنابيب التابعة لاستخدام التطبيق المباشر. ستترسب بعض المعادن منفصلة عن الماء عندما تنخفض درجة حرارة الماء. هذا

الترسب سيشكّل ترجيحاً في الأنابيب ويقلل من سعة التدفق للأنابيب. بترشيح الماء الساخن أو بإضافة معوّق للترجيح يمكن خفض تأثير الترجيح. وفي كلتا الحالتين، ستزداد تكاليف التشغيل.

أنظمة التدفئة الجيوحرارية

يوضح الشكل (12.4) أحد الأمثلة على التطبيقات الجيوحرارية بمبادل حراري. المكمن الجيوحراري هنا هو طبقة صخرية بماء ساخن أو بخار. يُستخدم بئر الإنتاج لسحب الماء الساخن من المكمن الجيوحراري ويُستخدم بئر الحقن لإعادة تدوير الماء. تساعد عملية تدوير الماء على الحفاظ على ضغط المكمن. إذا كان المكمن الجيوحراري صغيراً نسبياً، فإن الماء البارد المعاد تدويره يمكن أن يخفض درجة الحرارة الطبقة الصخرية. يتم الاحتياج إلى المضخة الكهربائية المبيّنة في الشكل لتساعد على سحب الماء لأن ضغط المكمن في هذه الحالة ليس عالياً بما فيه الكفاية لدفع الماء إلى سطح الأرض. تمر الحرارة الناتجة من المكمن الجيوحراري خلال المبادل الحراري ويتم توجيهها إلى شبكة التوزيع.



الشكل (12.4): نظام التدفئة الجيوحراري (شيفرد وشيفرد [1998، ص 149]؛ وهما أشارا إلى المرجع **موارد الطاقة العالمية** *World Energy Resources*؛ 1985-2020، مؤتمر الطاقة العالمي، لندن، المملكة المتحدة).

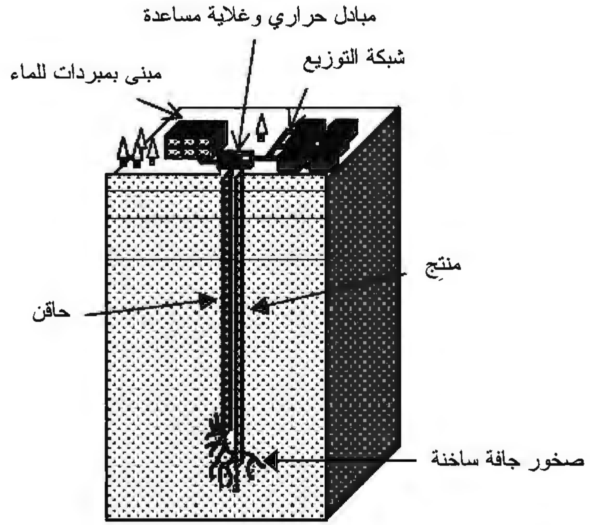
محطات الطاقة الكهربائية الجيوحرارية

تستخدم محطات الطاقة الكهربائية الجيوحرارية البخار أو الماء الساخن الناتج من المكامن الجيوحرارية لإدارة التوربينات وتوليد الكهرباء. محطات توليد الطاقة بالبخار الجاف تستخدم البخار مباشرة من المكمن الجيوحراري لإدارة التوربينات. ومحطات توليد الطاقة بالبخار الومضي تسمح للماء الساخن ذي الضغط العالي الناتج من المكمن الجيوحراري أن يتحول إلى بخار سريعاً (بلحظة الومضة) في خزانات ذات ضغط أقل. ويستخدم هذا البخار الناتج لإدارة التوربينات. والنوع الثالث من المحطات تسمّى محطة الدورة المزدوجة وتستخدم الحرارة المعتدلة للماء الجيوحراري لتحويل مائع آخر ومضياً إلى الطور البخاري. يجب أن تكون نقطة غليان المائع الآخر أقل من نقطة غليان الماء بحيث يتم تبخيره عند درجة الحرارة المعتدلة للماء الجيوحراري. كما يجب أن تكون هناك حرارة كافية في الماء الجيوحراري لتوفير الحرارة الكامنة للتبخير المطلوبة بواسطة المائع الآخر للقيام بتحول الطور من سائل إلى بخار. يُستخدم المائع الآخر المتبخر بعد ذلك لإدارة التوربينات.

إدارة المكامن الجيوحرارية

مثل مكامن النفط والغاز، فإن الماء الساخن أو البخار في المكامن الجيوحرارية يمكن أن يُستنفذ بالإنتاج. يعتمد طور الماء في المكمن الجيوحراري على ضغط ودرجة حرارة المكمن. ويمكن الحصول على الطور الأحادي البخاري في المكامن ذات درجات الحرارة العالية والضغط المنخفض. وفي المكامن ذات الضغط العالي، فإن الماء يمكن أن يوجد في طور السيولة أو في كل من طور السيولة والطور الغازي، وهذا يعتمد على درجة حرارة المكمن.

عندما يتم إنتاج الماء من المكمن الجيوحراري، فإن كلاً من الضغط ودرجة الحرارة في المكمن يمكن أن ينخفضا. وبهذا المعنى ، فإن الطاقة الجيوحرارية تصبح مصدراً محدوداً غير قابل للتجديد ما لم يتم استبدال الماء أو البخار المنتجين. ويمكن استخدام إمداد جديد للماء لاستبدال المائع الناتج أو إعادة تدوير المائع الناتج بعد الانتقال الحراري على سطح الأرض. وإذا كان معدل الانتقال الحراري من المكمن الحراري إلى المكمن الجيوحراري أبطأ من معدل استخلاص الحرارة من المكمن الجيوحراري، فإن درجة حرارة المكمن الجيوحراري ستنخفض في أثناء الإنتاج. لتحسين أداء المكمن الجيوحراري، يجب الإلمام بالمكمن الجيوحراري وإدارته تماماً بنفس طريقة إدارة المكامن البترولية. سيتم مناقشة إدارة المكامن البترولية في القسم 6.6.



الشكل (13.4): الطاقة الجيوحرارية من الصخور الجافة الساخنة

الصخور الجافة الساخنة

إن المصدر الآخر من مصادر الطاقة الجيوحرارية هو الصخور الجافة الساخنة الموجودة عند عدة كيلومترات في باطن الأرض. يتم تسخين هذه الصخور بواسطة الصهير الموجود تحتها مباشرة، وتمتلك درجة الحرارة اللازمة للارتفاع إلا أنها لا تمتلك الوسيلة اللازمة لنقل الحرارة إلى سطح الأرض. في هذه الحالة، من الممكن تقنياً حقن الماء في الصخور، وتركها تسخن، ومن ثم إنتاج الماء الساخن. يبيّن الشكل (13.4) رسماً توضيحياً لمنشأة الصخرة الجافة الساخنة المصممة لإعادة تدوير المائع الناقل للطاقة. يتم حقن الماء في شقوق الصخرة الجافة الساخنة من خلال الحاقن ومن ثم إنتاجه من خلال المنتِج. تستخدم محطة توليد الطاقة الموجودة على سطح الأرض الطاقة الحرارية الناتجة لإدارة التوربينات في المولد الكهربائي. وبعد أن ينقل المائع الساخن حرارته إلى محطة توليد الطاقة، يتم حقن المائع البارد مرة أخرى في الصخور الجافة الساخنة.

تعليقات ختامية

1- لمزيد من المناقشة عن نظريات تشكّل المجرات، انظر هويل (Hoyle) [1963]، وسيلك (Silk) [1987]، آبيل وآخرون [1991] (Abell [et al.])، وبورنر (Börner) [1993]، وفان دينبيرغ وهيسّر (ven den Bergh and Hesser) [1993]، وبيبلس (Peebles) [1993]، وماثر وبوسلو (Mather and Boslough) [1996]، وهيستر وآخرون (Hester, [et al.]) [2002]. ويناقش هويل [1963]، وستاهلر (Stahler) [1991]، وآبيل وآخرون [1991]، وهيستر وآخرون [2002] ميلاد النجوم. ويصف

سارجنت وبيكويذ (Sargent and Beckwith) [1993] البحث عن تشكّل الأنظمة الكوكبية. كما يصف بينزل وآخرون [1991] (Binzel, [et al.]) منشأ الكويكبات.

2- استعرض رينغوود (Ringwood) [1986] النظريات المتعلقة بالمنشأ الأرضي للقمر، ولخص تايلور (Taylor) [1994] الدليل الذي وصل من مركبة الفضاء أبوللو حول المنشأ الأرضي للقمر. وقد اقترح موللر (Muller) [1988] أن شمسنا هي في الواقع أحد نجمين في النظام النجمي المزدوج، وأن مدار النجم المرافق حول الشمس هو المسؤول عن إمطار الأرض بشكل دوري بالمذنبات.

3- المصادر الجيولوجية والجيوفيزيائية تتضمن ستوكس (Stokes) [1960]، وبريس وسيفر (Press and Siever, 1982)؛ وسيفر [1983]، وماكسويل (Maxwell) [1985]، وسكينر [1986] (Skinner)، ومونتغومري (Montgomery) [1990]، وليفن [1991] (Levin)، وآهرِنس (Ahrens) [1994]، ولوري (Lowrie) [1997]، وجينلوز ورومانويكز (Jeanloz and Romanowicz) [1997]، وغرنيس (Gurnis) [2001]. استعرض سكينر [1986] الدليل حول عمر الأرض وتكتونية الصفائح. وناقش هيربرت (Herbert) [1986] دور تشارلز داروين (Charles Darwin) كجيولوجي.

4- المناقشات عن تحديد العمر إشعاعياً متوفرة في مختلف المصادر بما في ذلك مونتغومري [1990]، وليفن [1991]، ويورك [1993]، ولوري [1997]، وبريس وسيفر [2001] في الجيولوجيا والجيوفيزياء؛ وغولد (Gould) [1993] وريدلي (Ridley) [1996] في الأحياء؛ ووليامز (Williams) [1991]،

وسيرواي وآخرون (Serway, [et al.]) [1997]، وبيرنشتاين وآخرون (Bernstein, [et al.]) [2000]، وليلي (Lilley) [2001] في الفيزياء.

5- لمزيد من المناقشة، انظر فانشي (Fanchi, 1993)، الفصل 13].

6- لمزيد من المناقشة عن النشاط الإشعاعي، انظر بيرنشتاين وآخرون [2000، القسم 6.15]. أو مورّاي (Murray) [2001، القسم 2.16].

7- لم يتم حساب العمر العلمي للأرض من دون جدال. قام جيرتسن (Gjertsen) [1984] بتوثيق التطور في النظرية الجيولوجية لتشارلز لييل (Charles Lyell)، كما قام هيلمان (Hellman) [1998] بوصف المناظرة التي دارت بين الفيزيائي اللورد كلفن (Lord Kelvin) وأعضاء الجمعيتين البيولوجية والجيولوجية.

8- لم يوافقه المؤيدون للعلوم العامة في عصره على أفكار ألفريد فيغنر. للاطلاع على المناقشة حول العقبات التي واجهها فيغنر، انظر هيلمان [1998].

9- للتفسيرات التقنية، انظر ديكر وديكر (Decker and Decker) [1998]، ولوري [1997]. ويقدّم أور وكوك (Orr and Cook) [2000] فكرة بسيطة ووشيكة عن تطورات جزر هاواي. ووصف كاين (Kane) [1996] فكرة ثوران البركان من وجهة نظر الأسطورة الهاواية والآلهة بيليه (Pele).

10- بعض المراجع الهامة عن مناقشة تدفق المائع في الأوساط المسامية تتضمن كولينز (Collins) [1961]، وبير (Bear) [1972]، وسيللي (Selley) [1998]، وأحمد (Ahmed) [2000]، وفانشي [2002]. كما إن هناك العديد من المراجع الأخرى في هذه المصادر.

11- بعض المراجع الهامة عن مناقشة الطاقة الجيوحرارية تتضمن سورينسن (Sϕrensen) [2000]، وشيفرد وشيفرد (Shepherd and Shepherd) [1998]، وبراون (Brown) [1996].

تمارين

1.4 احسب نصف المحور الأكبر لمدار الأرض باستخدام قانون كيلر الثالث.

2.4 تتحرك الصفائح التكتونية كلاً منها بالنسبة إلى الأخرى بمعدل يصل إلى 4 بوصات في السنة. كم المسافة التي ستفصل صفيحتين متحركتين عن بعضهما في 135 مليون سنة؟ عبّر عن إجابتك بالمتر والكيلومتر؟

3.4 تفصل قارة أميركا الجنوبية عن قارة أفريقيا مسافة حوالي 4500 ميل. إذا بدأت القارتان بالانفصال عن قارة بانجيا قبل حوالي 150 مليون سنة، فما هو معدل انفصالهما؟ عبّر عن إجابتك بالمتر لكل سنة وبالبوصة لكل سنة. كيف تقارن إجابتك بمعدل الانفصال المعطى في التمرين 2.4؟

4.4 درجة الحرارة في بعض الأجزاء من القشرة الأرضية تزداد بمعدل 1 °F لكل 100 ft من العمق. احسب درجة حرارة الأرض عند عمق ميلين. افترض أن درجة الحرارة عند سطح الأرض هي 60 °F. عبّر عن إجابتك بالدرجات المئوية (°C).

5.4 أ) يتناول رجل مادة معيّنة مشعة ويتلقى $6x10^{-5}$ J من الطاقة. إذا افترضنا أن كل هذه الطاقة امتُصت في الجهاز المعوي الذي يزن 2 kg، فما مقدار الجرعة التي تلقاها الرجل؟ عبّر عن إجابتك بالغراي (Gray).

ب) افترض أن المادة المشعة في (أ) كانت أشعة آلفا. ما مقدار

الجرعة المكافئة التي تلقاها الرجل؟ عبّر عن إجابتك بالسيفرت (sievert)Û

6.4 استخدم تعريف عمر النصف مع المعادلة (4.4.2) لاستنتاج المعادلة (4.4.5).

7.4 افترض أن معدل التعرية هي 3 mm لكل قرن. كم سيستغرق تعرية جبل بالكامل ارتفاعه 1 ميل؟ عبّر عن إجابتك بالسنوات.

8.4 أ) أحد التكوينات يحتوي على 24 ft من صخر الطَفَل غير المنفذ و76 ft من الحجر الرملي المنفذ. ما هو إجمالي السماكة لهذا التكوين؟

ب) ما النسبة بين الصافي إلى الإجمالي لهذا التكوين؟

9.4 أ) مكمن صخري طوله 1000 ft، وعرضه 2000 ft، وإجمالي سمكه 15 ft. ما الحجم الكتلي للصخرة؟ عبّر عن إجابتك بوحدات ft^3، وbbl، وm^3.

ب) إذا كانت مسامية المكمن الصخري هي 0.2 والنسبة بين الصافي إلى الإجمالي هي 0.8، فما الحجم المسامي للصخرة؟ عبّر عن إجابتك بوحدات ft^3، وbbl، وm^3.

ج) إذا كان التشبع الغازي للمكمن الصخري هو 0.7، فما حجم الغاز في الصخرة؟ عبّر عن إجابتك بوحدات ft^3، وbbl، وm^3.

10.4 الضغط عند بئر الحقن هو 3000 psi والضغط عند بئر الإنتاج هو 1500 psi. وبئر الحقن وبئر الإنتاج يفصلهما مسافة 1000 ft. والمائع المتحرك في المكمن بين بئر الحقن وبئر الإنتاج لزوجته 0.9 cp. وصافي السماكة للمكمن هو 15 ft وعرضه

الفعّال هو 500 ft. استخدم قانون دارسي لإكمال الجدول التالي:

النفادية (md)	معدل التدفق من الحاقن إلى المنتِج		
	برميل لكل يوم (bbl/day)	قدم مكعب لكل يوم (ft^3/day)	متر مكعب لكل يوم (m^3/day)
1			
10			
100			
1000			

11.4 إذا كان ضغط عمود من الماء هو 1000 psi عند عمق 2300 ft، فما هو الضغط عند عمق 2200 ft؟ افترض أن كثافة الماء هي 1 g/cm^3 وعجلة الجاذبية الأرضية $9.8\ m/s^2$. عبّر عن إجابتك بوحدتي psi وkPa.

12.4 أ) إحدى محطات الطاقة الكهربائية الجيوحرارية كانت قادرة على توفير 2000 MWe من القدرة الكهربائية عندما بدأت الإنتاج. وبعد عشرين عاماً، أصبحت المحطة قادرة فقط على توفير 850 MWe. بافتراض أن الانخفاض في إنتاج القدرة تقريباً خطّي، احسب متوسط الانخفاض السنوي في خرج القدرة (بوحدات MWe/year).

ب) افترض أن عامل المحطة قرر إغلاق المحطة عندما انخفض خرج القدرة الكهربائية إلى 10 MWe. فكم سنة إضافية أخرى ستعمل هذه المحطة إذا استمر خرج القدرة المحسوب في (أ) بالانخفاض؟

(ملاحظة: أُلحقت حرف e إلى الميغاوات (MWe) للدلالة على الميغاوات الكهربائية، وذلك للتفريق بينها وبين الميغاوات

الحرارية (MWt) التي يتم الدلالة إليها بإلحاق حرف t. سيتم شرح ذلك لاحقاً أيضاً في القسم 4 من الفصل 11).

13.4 عينة من لب الحجر الرملي قُطعت بدقة على شكل أسطوانة وقيست بعناية في المختبر. طول اللب الأسطواني هو 3 بوصات وقطره 0.75 بوصة. تم تجفيف اللب ووزنه، فوجد أنه يزن 125 غراماً. بعد ذلك تم إشباع اللب بماء عذب، فوجد أن اللب المشبع بالماء يزن 127.95 غراماً. احسب المسامية للب الحجر الرملي. أهمل وزن الهواء في اللب المجفف وافترض أن كثافة الماء هي $1\ g/cm^3$.

الفصل الخامس

منشأ الوقود الأحفوري

تأتي الطاقة الأحفورية من احتراق المادة التي تكوّنت من موت، وانحلال، وتحوّل الكائنات الحية على مدى فترة طويلة من الزمن. هذه المادة تسمّى الوقود الأحفوري. منشأ وتركيب الوقود الأحفوري يعتمد بشكل أساسي على المنشأ والتركيب الكيميائي الحيوي للكائن الحي. فإذا أردنا أن نفهم منشأ الوقود الأحفوري، يجب علينا فهم الأساس الجزيئي للكائن الحي[1].

إن الخلايا هي الوحدات الأساسية للكائن الحي. وكلمة «خلية» بدأت بالفيزيائي الإنجليزي روبرت هوك (Robert Hooke) في عام 1665. باستخدام المجهر، شاهد هوك تركيبات منتظمة الشكل في شريحة رقيقة من الفلين. هذه التركيبات سمّاها خلايا. ونعرف اليوم بأن «خلايا» هوك ليست سوى جدران السيلولوز. والاستخدام الحديث لكلمة خلية يشير إلى الوحدة الأساسية للكائن الحي. وهذه الدلالة جاءت نتيجة أبحاث عالم النبات الألماني ماتياس شلايدن (Matthias J. Schleiden) وابن بلده عالم الحيوان ثيودور شوان (Theodor Schwann).

وضع شلايدن وشوان فرضية بشكل مستقل في عام 1839

[والاس (Wallace)، 1990، ص 94] بأن جميع الكائنات الحية، بدءاً من الكائنات الحية المجهرية إلى الإنسان، مكوّنة من خلايا. وقد تم تأكيد فرضيتهما بالمشاهدة. كل كائن حي مبني من خلايا؛ والمحتويات الكيميائية لكل خلية محتواة ضمن حد يُسمّى الجدار الخلوي أو الغشاء الخلوي؛ وكل خلية تحتوي على مواد كيميائية ذات حجم وتعقيد كبيرين تعرف بالبروتينات والأحماض النووية. المادة المقدمة هنا مصممة لتسهيل مناقشتنا عن الطاقة الأحفورية والكتلة الحيوية في الفصول اللاحقة.

1.5 النماذج الذرية

قام الكيميائيون في القرنين الثامن عشر والتاسع عشر بالتمييز بين المواد الكيميائية للكائنات غير الحية والمواد الكيميائية للكائنات الحيّة، فأعطوا التصنيف الأول اسم مواد كيميائية غير عضوية والتصنيف الثاني اسم مواد كيميائية عضوية. واعتُبر التمييز ضرورياً لأن كيميائيي عصر ما بعد النهضة كانوا غير قادرين على تحضير مواد كيميائية عضوية من مواد غير عضوية. وعلى الرغم من أن التمييز مازال يتم في الوقت الحاضر، إلا أنه يُستخدم كأمر للاتفاق وليس للضرورة. الكيميائي الألماني فريدريش وُولر (Friedrich Wohler) أرجع التمييز إلى أنه غير ضروري في عام 1832. في ذلك الوقت، نشر وُولر بحثاً حول تصنيع مركب كيميائي عضوي من مركب غير عضوي. فقد تمكن من تحضير اليوريا بتسخين سيانات الأمونيوم. كان بحثه حدثاً بارزاً في الكيمياء وبادرة لعلم الأحياء الجزيئية. لفهم العلاقة بين هذين الفرعين من العلوم بشكل مناسب، يجب علينا اكتساب بعض المعلومات الأساسية عن الكيمياء والكيمياء الحيوية.

والكيمياء هي العلم الذي يهتم بدراسة العلاقات بين الذرات

والجُزَيئات. الجُزَيئات هي مجموعات الذرّات. والذرّات تتكون من سحابة إلكترونية حول النواة. والجسميات التي في النواة هي بروتونات موجبة الشحنة ونيوترونات متعادلة كهربياً. هذه الجُسَيمات تشغل حجماً صغيراً من الفراغ مقارنة بالحجم المشغول بواسطة الذرة. كانت المشكلة الهامة الكبرى في النصف الأول من القرن العشرين تتعلق بتحديد الآلية التي حفظت النواة من التشتّت نتيجة التنافر الكهربي بين البروتونات. هذه المشكلة تم حلها باكتشاف أن النوى مترابطة من خلال التفاعل القوي.

التفاعل القوي وجهد يوكاوا

قدّم الفيزيائي الياباني هايدكي يوكاوا (Hideki Yukawa) فكرة جهد التفاعل القوي في عام 1934. وجهد يوكاوا نظير لجهد كولوم (Coulomb). صوّر يوكاوا التفاعل القوي بأنه قوة متبادلة بين نواتين. هذه القوة النووية يتخللها تبادل جُسَيم كتلته m_μ. أما التفاعل الكهرومغناطيسي فهو قوة بين جُسَيمين مشحونين يتخللها تبادل فوتون. والفوتون هو جُسَيم ضوئي عديم الكتلة. طاقة جهد كولوم بين جُسَيمين شحنتاهما q_1 وq_2 وتفصلهما مسافة r هي:

$$V_{\text{Coulomb}} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon_0}\frac{1}{r} \qquad (5.1.1)$$

وطاقة جهد يوكاوا بين نويتين تفصلهما مسافة r هي:

$$V_{\text{Yukawa}} = -g^2 \frac{\exp\left(\frac{-m_\mu c r}{\hbar}\right)}{r} \qquad (5.1.2)$$

حيث g ثابت الاقتران وهو مناظر للشحنة الكهربائية، وc سرعة الضوء في الفراغ، و$\hbar$ هو ثابت بلانك h مقسوماً على 2π.

اعتماد جهد يوكاوا على المسافة r يؤدي إلى اعتماد جهد كولوم

على المسافة عندما تؤول كتلة الجُسَيم المتخلل إلى الصفر، أي عندما $m\mu \leftarrow 0$. انخفاض تدريجي في مقدار القوة النووية مع زيادة المسافة r بين النويتين. مدى الجهد $r0$ هو قيمة r التي تتوافق مع العامل الأسّي المساوي e، أو:

$$e^{-1} = \exp\left(\frac{-m_{\mu}cr_0}{\hbar}\right) \Rightarrow 1 \Rightarrow \frac{m_{\mu}cr_0}{\hbar} \qquad (5.1.3)$$

وبالتالي فإن:

$$r_0 = \frac{\hbar}{m_{\mu}c} \qquad (5.1.4)$$

ومن هذه المعادلة نرى أن المدى r_0 للتفاعل القوي يتناسب عكسياً مع الكتلة m_μ للجُسَيم المتبادل. ويؤول المدى إلى ما لا نهاية عندما تؤول كتلة الجُسَيم المتبادل إلى الصفر.

قوة الترابط للتفاعل القوي أكبر من قوة التنافر للتفاعل الكهرومغناطيسي بين البروتونات للمقاييس التي بحجم النوى. وعندما يزداد الحجم الفراغي، فإن التفاعل السائد يتحول من التفاعل القوي إلى التفاعل الكهرومغناطيسي. والسحابة الإلكترونية المرافقة للذرات المتعادلة كهربياً مرتبطة بنواة الذرة من خلال التفاعل الكهرومغناطيسي.

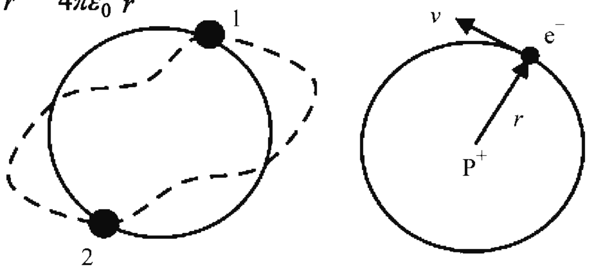
نموذج بوهر

وضع الفيزيائي الدنماركي نيلز بوهر (Niels Bohr) (1962-1885) أول نموذج حديث للذرة في عام 1913. وعلى الرغم من أن بوهر قضى معظم حياته المهنية كفيزيائي دنماركي في كوبنهاغن، إلا أنه تلقى تعليمه لما بعد الدكتوراه في الفيزياء في مختبر كافنديش (Cavendish) في كامبردج بإنجلترا مع السير ج. تومسون (Sir J. J. Thomson). وتومسون معروف عنه باكتشافه للإلكترون. عمل بوهر بعد ذلك مع السير إرنست

رذرفورد (Sir Ernest Rutherford) في مانشستر بإنجلترا. ورذرفورد هو رائد المفهوم الحديث للنواة الصغيرة في قلب الذرة. وكان رذرفورد تجريبياً يسعى إلى تفسير نتائج تجارب التشتت التي تتشتت فيها جُسَيمات آلفا (أيونات هيليوم موجبة الشحنة) عن الرقاقة المعدنية. شاهد رذرفورد زوايا تشتت حادة وكان أفضل تفسير لها بأنها ذرّة بنواة كتلية صغيرة موجبة الشحنة. بعد تفسير رذرفورد، وضع بوهر تصوراً بأن الإلكترونات تدور حول النواة بنفس الطريقة التي تدور بها الكواكب حول الشمس، إلا أن بوهر أضاف أفكاراً جديدة من النظرية الكمية لتكميم مستويات الطاقة الذرية.

يبيّن الشكل (1.5) (أ) رسماً توضيحياً لنموذج بوهر لذرّة الهيدروجين. قانون لقوة لنيوتن للإلكترون الذي يدور حول النواة يعبّر عن أن هناك تساوياً بين حركة الجذب المركزية للإلكترون وقوة كولوم المؤثرة على البروتون الموجب الشحنة ذي الكتلة الأكبر عند مركز الذرّة. بكتابة m_e لكتلة الإلكترون، وq لشحنة الإلكترون، وv_e لسرعة الإلكترون، وr للمسافة من مدار الإلكترون إلى مركز الذرّة، نحصل على :

$$m_e = \frac{v_e^2}{r} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q^2}{r^2} \qquad (5.1.5)$$



ب- موجتان واقفتان
$n = 2$ (عقدتان)

أ- نموذج بوهر المداري

الشكل (1.5): نموذج بوهر لذرة الهيدروجين

طاقة حركة الإلكترون الذي يدور حول النواة يمكن إيجادها من المعادلة (5-1-5) لتكون:

$$K_e = \frac{1}{2}m_e v_e^2 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q^2}{2r} \qquad (5.1.6)$$

بجمع طاقة حركة الإلكترون وطاقة جهد كولوم نحصل على الطاقة الكلية كالتالي:

$$E = K_e + V_{\text{Coulomb}} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q^2}{2r} - \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q^2}{r} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q^2}{r}\left(\frac{1}{2}-1\right) = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q^2}{2r} \qquad (5.1.7)$$

عندما تكون الطاقة الكلية سالبة، فإن النظام يكون في حالة ترابط. المعادلات من (5.1.5) إلى (5.1.7) هي علاقات من وجهة نظر الفيزياء الكلاسيكية. نقوم الآن بتطبيق هذه المفاهيم من وجهة نظر النظرية الكمية.

نفترض أن للإلكترون طولاً موجياً قدره:

$$\lambda = \frac{h}{m_e v_e} = \frac{h}{P_e} \qquad (5.1.8)$$

حيث h ثابت بلانك وP_e مقدار كمية التحرك للإلكترون. نفترض أيضاً أن الذرّة لا تشع موجات كهرومغناطيسية عندما تكون في حالة الاستقرار. وحالة الاستقرار هو المدار الذي يحقق الشرط الكمي التالي:

$$n\lambda = 2\pi r_n, \quad n = 0,1,2,3,\ldots \qquad (5.1.9)$$

حيث n تسمّى العدد الكمي الرئيسي (Principal Quantum Number). تشير المعادلة (5.1.9) إلى أن هناك عدداً صحيحاً من الأطوال الموجية، أو الموجات الواقفة، على طول محيط المدار. ويوضح الشكل (1.5) (ب) حالة الاستقرار المناظرة لموجتين واقفتين

عندما $n = 2$. بتعويض المعادلة (5.1.9) في المعادلة (5.1.8) نحصل على :

$$n\frac{h}{m_e v_e} = 2\pi r_n \qquad (5.1.10)$$

حيث r_n هي أنصاف أقطار المدارات المسموحة، أو:

$$n\frac{h}{2\pi} = n\hbar = m_e v_e r_n \qquad (5.1.11)$$

الطرف الأيمن في المعادلة (5.1.11) هو كمية التحرك الزاوي للإلكترون. نستخدم هذه المعادلة لإيجاد القيم المسموحة لسرعة الإلكترون على النحو التالي:

$$(v_e)_n = \frac{n\hbar}{m_e r_n} \qquad (5.1.12)$$

بتعويض المعادلة (5.1.12) في المعادلة (5.1.6) نحصل على :

$$\frac{1}{2}m_e\left(\frac{n\hbar}{m_e r_n}\right)^2 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q^2}{2r_n} \qquad (5.1.13)$$

التعبير الآخر لأنصاف أقطار المدارات المسموحة نحصل عليه من المعادلة (5.1.13). وهذا يمكن كتابته على الصورة التالية:

$$r_n = (4\pi\varepsilon_0)\frac{n^2\hbar^2}{m_e q^2} \qquad (5.1.14)$$

طاقة كل حالة استقرار، أو مدار، يمكن إيجادها بدمج المعادلتين (5.1.7) و(5.1.14) للحصول على :

$$E_n = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q^2}{2r_n} = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q^2}{2}\left(\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{m_e q^2}{n^2\hbar^2}\right) \qquad (5.1.15)$$

أو:

$$E_n = -\frac{1}{(4\pi\varepsilon_0)^2}\frac{m_e q^4}{2n^2\hbar^2}, \quad n = 0,1,2,3,\ldots \qquad (5.1.16)$$

استخدم بوهر نموذجه لتفسير أطياف ذرّة الهيدروجين. وطيف أي عنصر مثل الهيدروجين يظهر من إطلاق أشعة كهرومغناطيسية عندما ينتقل الإلكترون من المدار الأعلى طاقة إلى المدار الأقل طاقة. طاقة الفوتون المنبعث عندما يصنع الإلكترون انتقالاً من المدار i إلى المدار j يمكن حسابها من نموذج بوهر على النحو التالي:

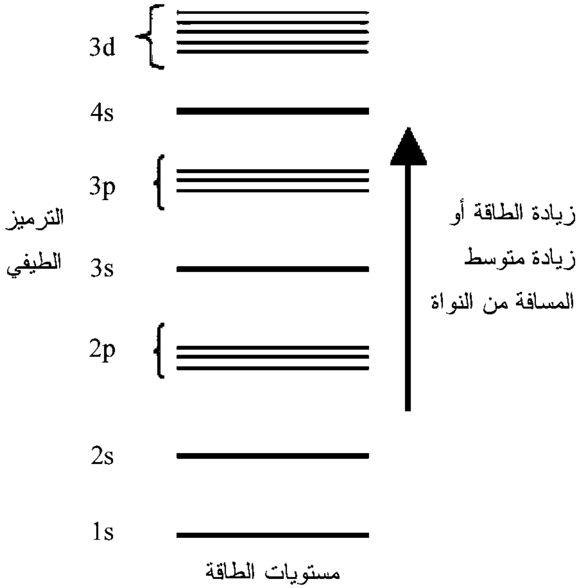
$$h\nu_{ij} = E_i - E_j = -\frac{1}{(4\pi\varepsilon_0)^2}\frac{m_e q^4}{2\hbar^2}\left(\frac{1}{i^2} - \frac{1}{j^2}\right) \qquad (5.1.17)$$

وهذه المعادلة تتفق مع النتائج التجريبية.

إن فكرة الانتقال بين مدارات الطاقة هي مفهوم هام في التطبيقات مثل تقنية الليزر. يشع الليزر ضوءاً بطول موجي معيّن عن طريق إثارة الإلكترونات في الذرات إلى مدار طاقة أعلى ومن ثم تركيز الضوء المنبعث عندما يصنع الإلكترون انتقالاً إلى مدار طاقة أقل. العلاقة بين الطاقة E، والطول الموجي، والتردد ν للضوء تعطى بالمعادلة التالية:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \qquad (5.1.18)$$

حيث h ثابت بلانك. وبالإضافة إلى التطبيقات العسكرية الهائلة، تُستخدم الليزرات لتطوير الاندماج النووي. وإمكانية شعاع الليزر على اختراق المادة قد شجع على البحث في تطبيق الليزر للحفر.



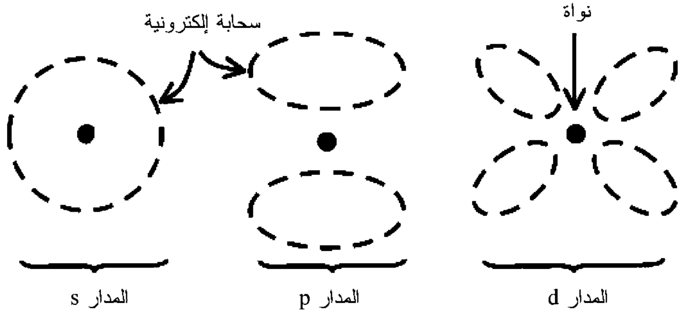
الشكل (2.5): مستويات الطاقة

تبيّن المعادلة (5.1.16) بأن الفرق في الطاقة بين المدارات المسموحة مكمّم. وطاقات الإلكترون مكممة في كل من نموذج بوهر والنموذج الذري الحديث. وبالرجوع إلى الأحداث الماضية، فإن نجاح نموذج بوهر الذري كان إلى حد كبير نتيجة إدماج مستويات الطاقة المكممة في نموذجه. بعض مستويات الطاقة مرسومة كخطوط أفقية في الشكل (2.5) مع ترميزها الطيفي. هذه المستويات تمثل الطاقات المسموحة فقط التي يستطيع الإلكترون شغلها في الذرّة. ولا يُسمح بأي قيم أخرى للطاقة وفقاً للنظرية الكمية. والقياسات التجريبية تدعم هذا المتطلب النظري.

كان نموذج بوهر متوافق مع العديد من النتائج التجريبية، وخصوصاً تلك المتعلقة بالطيف الذري، إلا أن نموذجه احتوى على

فرضيات ناقضت المبادئ النظرية التي كانت مقبولة آنذاك. وكان بحث بوهر على التركيب الذري قد جاء في الوقت الذي لم يكن ممكناً فيه تجاهل أخطاء الفيزياء الكلاسيكية. وفي الحقيقة، كان نموذج بوهر الذري مستنداً إلى تأليف مرتجل من المفاهيم الكلاسيكية والمفاهيم الكمية المبكرة. أي إنه كان نموذجاً عابراً.

تستند النماذج الحديثة للتركيب الذّري إلى معتقدات النظرية الكمية. كما إن النماذج الحديثة لها كثير من الشبه لنموذج بوهر. فالإلكترونات لا تزال تشغل معظم حجم الذرّة، والنوى ما زالت محاطة بالإلكترونات. ومواضع الإلكترونات لا يمكن معرفتها بشكل يقيني، ولكن بالاتفاق مع مبدأ عدم اليقين لهايزنبرغ (Heisenberg's Uncertainty Principle). ومدارات الإلكترون الحتمية لبوهر يُنظر إليها الآن كاحتمالية لمدارات إلكترونية أو كسحب إلكترونية مما تدل على الافتقار إلى الدقة في موضع الإلكترون. نستطيع حساب احتمال تحديد موقع إلكترون عند مواضع مختلفة حول النواة. شكل توزيع الاحتمالية هو شكل السحابة الإلكترونية. والأشكال النموذجية للمدارات الإلكترونية أو السحب مبيّنة في الشكل (3.5).



الشكل (3.5): المدارات الإلكترونية في الذرات

الصفات المميِّزة للذرّة

تستند الصفات المميِّزة للذرات إلى عدد البروتونات في النواة. والذرّة المتعادلة كهربياً يجب أن يكون فيها عدد الإلكترونات السالبة الشحنة في السحابة الإلكترونية مساوياً لعدد البروتونات الموجبة الشحنة في نواتها. والعدد الذري هو عدد البروتونات في النواة. وعدد الإلكترونات يساوي عدد البروتونات عندما تكون الذرّة متعادلة كهربياً. وعدد النيوترونات في نواة الذرّة عادة ما يكون مساوياً لعدد البروتونات أو أكبر منه.

الرمز الذري للعنصر يمكن كتابته على النحو $^{A}_{Z}X$ حيث X رمز العنصر، وA العدد الكتلي، وZ العدد الذري. العدد الكتلي للذرّة هو العدد الكلي للبروتونات والنيوترونات في النواة. على سبيل المثال، الكربون–12 نظير مستقر للكربون ويحتوي على ستة بروتونات وستة نيوترونات. والرمز الذري له هو $^{12}_{6}C$، والعدد الكتلي له هو 12، والعدد الذري له هو 6. وعدد النيوترونات هو الفارق بين العدد الكتلي والعدد الذري.

إن ذرّات أيّ عنصر قد تكون لها أعداد مختلفة من النيوترونات في النواة. هذه الذرات تسمى نظائر العنصر. على سبيل المثال، الكربون–14 نظير غير مستقر للكربون ويحتوي على ستة بروتونات وثمانية نيوترونات. الرمز الذري له هو $^{14}_{6}C$، والعدد الكتلي له هو 14، والعدد الذري له هو 6. والكتلة الذرية للعنصر هي متوسط كتل النظائر الموجودة في الطبيعة.

تملأ الإلكترونات الذرّية مستويات الطاقة بدءاً بالطاقة الأقل أولاً. ويُسمح فقط بإلكترونين في كل مستوى طاقة. والحصر على إلكترونين يعود سببه إلى قوانين ميكانيكا الكم، كما إن له علاقة بغزْل الإلكترون (Spin).

تسلك الإلكترونات في وجود مجالات مغناطيسية وكأنها تغزل مثل الدوامات. وقد اقترح الفيزيائي الأميركي أوتُو ستيرن (Otto Stern) فكرة غزْل الإلكترون في عام 1921. بعدها بعام واحد، أثبت ستيرن وابن بلده والتر غيرلاخ (Walter Gerlach) وجود غزل الإلكترون تجريبياً. لقد شاهدا بأن حزمة من ذرات الفضة تنفلق إلى حزمتين بواسطة مجال مغناطيسي غير متجانس. وتم تفسير نتائجهما في عام 1925 عندما أدخل الفيزيائيان الأميركيان من أصل هولندي غودسميت (S. A. Goudsmit) وأولينبيك (G. E. Uhlenbeck) مفهوم غزل الإلكترون. وهناك فقط قيمتان ممكنتان لغزل الإلكترون. هاتان القيمتان يشار إليهما بأسماء عديدة مثل: غزل نحو الأعلى وغزل نحو الأسفل، وغزل مع عقارب الساعة وعكس عقارب الساعة، واللولبية. واللولبية هي المفهوم العام جداً. وتحدد اللولبية اتجاه غزل الجُسَيم بالنسبة إلى اتجاه حركته. وغزل الإلكترون هو أحد أربعة أعداد كمية تميّز سلوك الإلكترون في الذرّة. والأعداد الكمية الثلاث الأخرى تحدد الترتيب الفراغي للسحابة الإلكترونية.

إن العدد الكمّي الهام، وهو العدد الكمّي الرئيسي، يمثل متوسط بُعد الإلكترون من النواة الذرية. والعدد الكمّي الثانوي يميّز شكل المدار الإلكتروني. ثلاث من الأمثلة على الأعداد الكمية الثانوية مبيّنة في الشكل (3.5). وتستخدم الحروف لتمثل الأعداد الكمية الثانوية. هذا الاستخدام للترميز الطيفي ممارس منذ القدم. وبعض الحروف الأولى المستخدمة هي s، p، d، f. هذه الحروف تدل على الأعداد الكمية الثانوية بالقيم المطلقة 0، 1، 2، 3 على التوالي. ويبيّن الشكل (2.5) العدد الكمي الرئيسي والأعداد الكمية الثانوية لمستويات الطاقة الأدنى للإلكترون. على سبيل المثال، يدل الترميز الطيفي 2p على العدد الكمي الرئيسي 2 والعدد الكمي الثانوي بقيمة مطلقة 1.

كلما ازداد العدد الكمي الرئيسي يزداد متوسط المسافة للإلكترون من النواة. والعدد الكمي الثانوي يحدد شكل المدار الإلكتروني. أما العدد الكمي الثالث، ويُسمّى العدد الكمي المغناطيسي، فيحدد توجه السحابة الإلكترونية في الفراغ. المدار s، على سبيل المثال، هو توزيع كروي. وبالمقابل، فإن المدار p منفلق إلى ثلاثة مستويات طاقة لأنه يمكن رصفها خطياً على طول المحور *x*، والمحور *y*، والمحور *z*. وهناك خمسة توجهات فريدة ممكنة للمدار d، وهي ممثلة بخمسة مستويات طاقة في الشكل (2.5) للترميز الطيفي 2d. ويضيف الشكل (4.5) العدد الكمي المغناطيسي إلى الترميز الطيفي للمدار 2p.

	1s	2s	$2p_x$	$2p_y$	$2p_z$
الهيدروجين	↑				
الهيليوم	↑↓				
الليثيوم	↑↓	↑			
البيريليوم	↑↓	↑↓			
البورون	↑↓	↑↓	↑		
الكربون	↑↓	↑↓	↑	↑	
النيتروجين	↑↓	↑↓	↑	↑	↑
الأوكسجين	↑↓	↑↓	↑↓	↑	↑
الفلور	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑
النيون	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓

↑ غزل نحو الأعلى
↓ غزل نحو الأسفل

الشكل (4.5): الذرات البسيطة

أدرك الفيزيائي النمساوي فولفغانغ باولي (Wolfgang Pauli) في عام 1924 بأنه يستطيع إعادة تكوين الجدول الدوري فقط إذا افترض بأن كل إلكترون في الذرّة يجب أن يكون لديه مجموعة فريدة من الأعداد الكمية. وكل مدار إلكتروني يمكن أن يحوي فقط إلكترونين

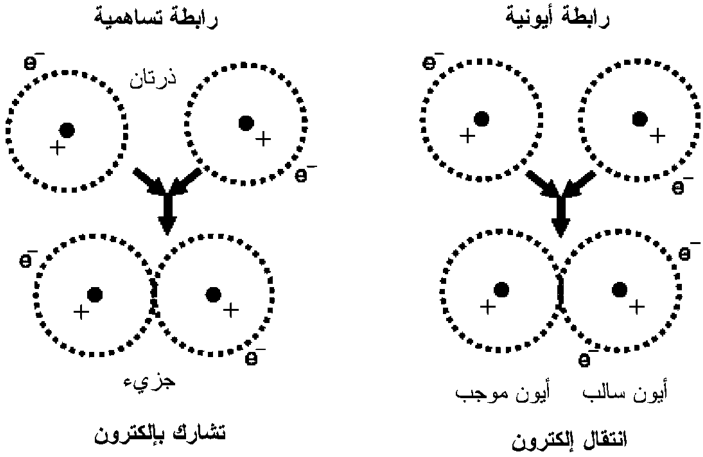
كحد أعلى ، وأن الإلكترونين في كل مدار يجب أن تكون لهما قيم مختلفة من العدد الكمي الغزْلي. هذا الافتراض لباولي يعرف بقاعدة باولي للاستثناء (Pauli Exclusion Principle) . وقاعدة باولي للاستثناء مرتبطة إلى حد كبير بالسلوك الإحصائي للعديد من الجُسَيمات المتماثلة. ومناقشة هذه النقطة ستقودنا إلى مجال بعيد جداً عن أهدافنا.

يبيّن الشكل (4.5) المدارات الإلكترونية لبعض العناصر الأولى . الترتيب الإلكتروني للهيليوم، على سبيل المثال، هو نفس الترتيب للهيدروجين زائداً إلكترون واحد أضيف لتكملة المدار 1s . والترتيب الإلكتروني لكل ذرّة تالية يتم إعداده بإضافة إلكترون إلى المدار الإلكتروني الأقل طاقة غير المشغول. ويمكن فهم الترتيب الإلكتروني لكل ذرّة معروفة باتباع هذه الطريقة.

2.5 علم الأحياء الجزيئية

إن الجُزَيئات، أو مجموعات الذرّات، مترابطة مع بعضها من خلال تفاعلات بين المدارات الإلكترونية. وتُعرف النظرية الحديثة للترابط الجزيئي وتُعرف بنظرية المدار الجزيئي. وفقاً لهذه النظرية، فإن طاقة الذرّة تكون عند أدنى قيمة عندما تُملأ جميع مداراتها الإلكترونية الخارجية. الهيليوم والنيون في الشكل (4.5) مثالان على المدارات الإلكترونية الممتلئة. وكلٌ من هذين العنصرين خامل كيميائياً. لتحقيق هذه الحالة، فإن الذرات التي مداراتها الإلكترونية الخارجية ممتلئة جزئياً ستتشارك بالإلكترونات، إما بأن تتخلى عن إلكترونات أو تأخذ إلكترونات من الذرات الأخرى . على سبيل المثال، سيتخلى الهيدروجين عن إلكترونه الوحيد للفلور عند تصنيع متفجر من جزيء فلوريد الهيدروجين. كما يمكن لذرتي هيدروجين مع ذرّة أكسجين أن تتحد لتكوين جزيء الماء. وملح الطعام، أو

كلوريد الصوديوم، هو جزيء بذرّة صوديوم واحدة وذرّة كلور واحدة. والماء وملح الطعام يمثلان نوعين هامين من الروابط بين الذرات في الجُزَيء هما الروابط الأيونية والروابط التساهمية، كما هو مبيّن في الشكل (5.5).



الشكل (5.5): الروابط الجزيئية

الروابط بين ذرات الأكسجين والهيدروجين في الماء هي روابط تساهمية: تشارك بإلكترونات. ويتم التشارك بإلكترونات عندما تكون مداراتها متداخلة في الفراغ. هذا التداخل يمثل احتمال إيجاد إلكترون متشارك في مدار الذرّة المضيفة أو في مدار الذرّة المرتبطة.

وروابط كلوريد الصوديوم هي روابط أيونية: أي يتخلى الصوديوم عن إلكترون واحد ويصبح موجب الشحنة بينما يتقبل الكلور الإلكترون الذي فقده الصوديوم ويصبح سالب الشحنة. الشحنات المتضادة في ذرات كلوريد الصوديوم المتأيّنة تؤدّي إلى تجاذب كهرومغناطيسي. هذا التجاذب هو الرابطة الأيونية. ويمكن

للرابطة الأيونية أن تنكسر عندما يتحلل الجُزَيء الأيوني في محلول. وأيّ محلول بسيط يحتوي على كمية أقل من مادة ما تسمى المذاب (Solute) متحللة في كمية أكبر من مادة ما تسمى المذيب (Solvent). ويعتبر الماء مذيباً جيداً لتحلل الجُزَيئات الأيونية. المحلول الأيوني الناتج يمكنه أن يستجيب للمجالات الكهربية والمغناطيسية المطبقة. هذه المشاهدة لها تطبيقات عديدة في مجالات تتفاوت من الكيمياء الكهربية إلى هندسة المكامن. على سبيل المثال، يمكن استخدام قياسات المقاومة لتعيين تشبع المحلول الملحي في الصخور. وفي الكيمياء الكهربية، الخلية الفولتية (Voltaic Cell) هي عبارة عن محلول أيوني يتفاعل مع شريحة معدنية لتوليد طاقة كهربائية. ويمكن إيجاد الخلايا الفولتية عادة في البطاريات.

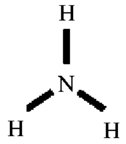
جزيئات ثنائية الذرة

رابطة أحادية	$H-H$	الهيدروجين H_2
رابطة ثنائية	$O=O$	الأوكسجين O_2
رابطة ثلاثية	$N\equiv N$	النيتروجين N_2

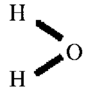
ذرات

H	الهيدروجين
O	الأوكسجين
N	النيتروجين
C	الكربون

جزيئات بسيطة



النشادر NH_3



الماء H_2O

$H-C\equiv N$ سيانيد الهيدروجين HCN

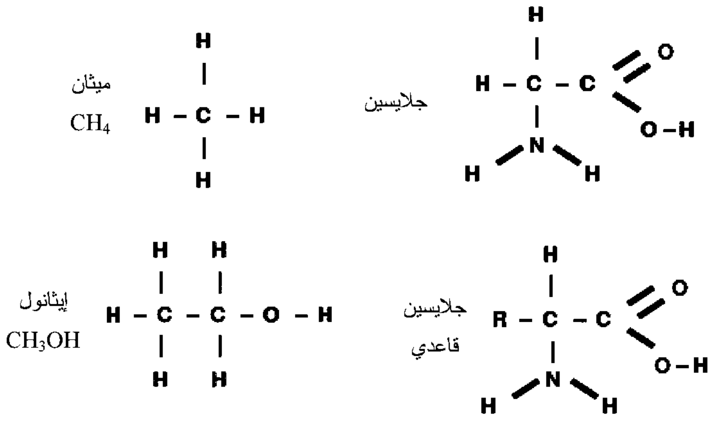
$O=C=O$ ثاني أكسيد الكربون CO_2

الشكل (6.5): بعض الجزيئات البسيطة

يبيّن الشكل (6.5) أمثلة على الجُزَيئات. يُرمز إلى الرابطة الجزيئية بشَرطة (−) بين الذرتين المرتبطتين. وكل شَرطة تمثل

التشارك بإلكترونين. والتشارك بزوجين أو بثلاثة أزواج من الإلكترونات يمكن أن يشكّل رابطة جزيئية. هذه الروابط المتعددة يشار إليها بروابط ثنائية وروابط ثلاثية، ويتم تمثيلها بشَرطتين (=) وثلاث شَرطات (≡) على التوالي. جزيء الأكسجين وجزيء النيتروجين من الأمثلة على الجُزَيئات بروابط ثنائية وثلاثية.

يحتوي الشكل (7.5) رسوماً لثلاث جُزَيئات عضوية بسيطة. الاختلاف الأساسي بين المواد الكيميائية غير العضوية والعضوية هو أن المواد العضوية هي مركبات كربونية. وهناك العديد من الجُزَيئات التي تحتوي على الكربون لدرجة أنه قد أصبح من الجدير أن نميز بين كيمياء المركبات الكربونية وكيمياء كل شيء غير ذلك. الكيمياء العضوية هي كيمياء المركبات الكربونية. والكيمياء الحيوية، أو كيمياء الكائن الحي، يمكن اعتبارها فرع من الكيمياء العضوية. وعلم الأحياء الجزيئية هو العلم الذي يهتم بدراسة كيمياء الكائن الحي على المستوى الجزيئي.



الشكل (7.5): بعض الجزيئات العضوية

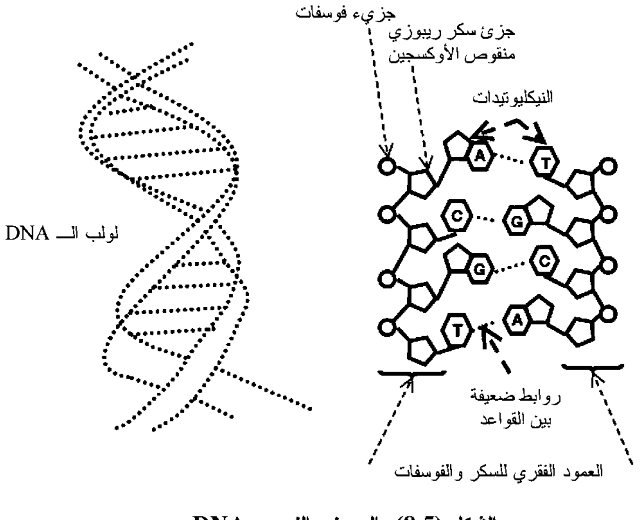
الصنفان الهامان جداً من مواد الكيمياء الحيوية هما البروتينات والأحماض النووية. تتكوّن البروتينات من مجموعة من عشرين من الجُزَيئات الصغرى تسمى أحماضاً أمينية. الجلايسين (Glycine) مثال على الحمض الأميني ومبيّن في الشكل (7.5). وباستثناء البرولين (Proline)، فإن كل حمض أميني متكون بشكل طبيعي لديه الجلايسين القاعدي. يمثل الرمز R في الجلايسين القاعدي مجموعات الذرات التي تُشكّل مختلف الأحماض الأمينية. ويتكون الجلايسين باستبدال R بذرّة هيدروجين H. واستبدال هيدروجين الجلايسين بمجموعات عضوية أخرى يكوّن أحماضاً أمينية مختلفة. يبيّن الجدول (1.5) بعض الاستبدالات والأحماض الأمينية الناتجة.

يمكننا تكوين رابطة بين حمضين أمينيين بدمج مجموعة الهيدروكسيل (OH) من أحد الحمضين الأمينيين مع ذرّة هيدروجين من الحمض الأميني الآخر. والنتيجة هي تكوّن الماء مع رابطة بين الحمضين الأمينيين. تكرار هذه العملية يؤدي إلى تكوين سلاسل طويلة من الأحماض الأمينية. هذه السلاسل، أو البوليمرات، من الأحماض الأمينية هي بروتينات. الإنزيمات صنف هام من البروتينات وتعمل كمواد حفازة في الخلية. والإنزيمات بحد ذاتها يمكن أن تسرّع من العملية الكيميائية من دون أن تتغير بالعملية. كما إن الإنزيمات ضرورية لتضاعف الأحماض النووية.

الجدول (1.5) الأحماض الأمينية النموذجية

مجموعة R	الحمض الأميني
الهيدروجين H	جلايسين (Glycine)
مجموعة الميثيل CH_3	ألانين (Alanine)
CH_2OH	سيرين (Cerine)
$C_4H_8NH_2$	لايسين (Lycine)

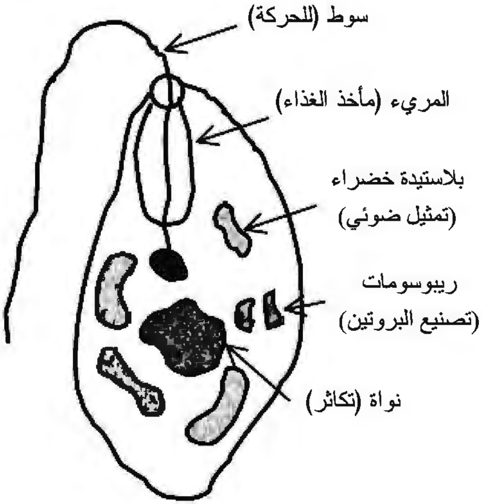
يوجد أساساً نوعان من الأحماض النووية: الحمض النووي الريبوزي منقوص الأكسجين (Deoxyribonucleic Acid DNA) والحمض النووي الريبوزي (Ribonucleic Acid RNA). حمض DNA عبارة عن جزيء كبير تكوّن من اتحاد أربعة جُزَيئات صغرى متصلة بسكر ريبوزي منقوص الأكسجين وفوسفات وقاعدة. يبيّن الشكل (8.5) رسماً توضيحياً لجزيء DNA. يوجد جزيء DNA على شكل لولب مزدوج. وكل جديلة لولبية عبارة عن سلسلة من جُزَيئات السكر الريبوزي منقوص الأكسجين والفوسفات. وملحق بالجديلة اللولبية جُزَيئات عضوية تعرف بالبيورينات (أدينين وجوانين) والبيريميدينات (ثيامين وسيتوسين). ويمكن للبيورين أن يرتبط بالبيريميدين لتكوين رابطة بين جديلتين لولبيتين وتكوين لولب الـ DNA المزدوج. يُستخدم الحرفان A وG لترميز الأدينين والجوانين التابعين للبيورين في الشكل (8.5)، كما يُستخدم الحرفان T وC لترميز الثيامين والسيتوسين التابعين للبيريميدين.



الشكل (8.5): الحمض النووي DNA

إن الحمض النووي هو المادة الوراثية في الخلية. ويقوم الحمض النووي بتشفير وظيفة الخلية والتحكم في التكاثر. تقوم الريبوزومات (Ribosomes) في الخلية بترجمة الشفرة الوراثية المحمولة بواسطة الأحماض النووية إلى البروتينات. القواعد التي تنظم ترابط الحمض النووي تعرف بقواعد «واتسون ـ كريك» نسبة إلى عالمي الفيزياء الحيوية الأميركيين فرانسيس كريك (Francis Crick) وجيمس واتسون (James Watson) اللذين اكتشفا هذه القواعد. وكريك وواتسون كانا أول من اختزل التركيب الجزيئي للـ DNA. ووجدا بأن الأدينين ملحق فقط بالثيامين، والجوانين مقترن فقط بالسيتوسين. والترتيب الفراغي لزوجي الأدينين ـ ثيامين والجوانين ـ سيتوسين على طول بنية جزيء الـ DNA هي الصفة التي تميّز الـ DNA. أما جُزَيء الـ RNA فهو القالب الذي بواسطته يتضاعف الـ DNA.

إن جزيء RNA هو تركيب أحادي اللولب. وعلى العكس من الـ DNA الذي يوجد أساساً في نواة الخلية، فإن الـ RNA يوجد بشكل أساسي في الريبوزومات المصنِّعة للبروتون. يوضح الشكل (9.5) المكونات الأساسية للخلية ووظائفها. هذه الخلية عبارة عن مصنع كيميائي حيوي مكسوّة بغشاء مسامي. المحتوى الكيميائي للـ RNA مشابه للمحتوى الكيميائي للـ DNA. وبالإضافة إلى المساعدة على تضاعف الـ DNA في أثناء انقسام الخلية، يؤدي الـ RNA أيضاً دوراً هاماً في تصنيع بروتينات الخلية. ويتم تصنيع بروتينات الخلية بحسب التعليمات الموجودة في جُزَيء الـ DNA. ولا يمكن استخدام معلومات الـ DNA مباشرة في تصنيع البروتين؛ بل يجب التواصل باستخدام وسيط. وجُزَيء الـ RNA هو الوسيط.



الشكل (9.5): كائن حي أحادي الخلية

يتطلب تكاثر الكائن الحي أحادي الخلية، مثل اليوغلينا، من سلالة السوطيات المرسومة في الشكل (9.5)، تضاعفاً دقيقاً للـ DNA التابع للخلية. فقد تحدث طفرات أو أخطاء في تضاعف الـ DNA. هذه الأخطاء تؤدي إلى تغيرات في نوع الخلية الأحادية. أما الكائنات الحية الأكثر تعقيداً والنشيطة تزاوجياً فإنها تصنع باستمرار تركيبات جديدة من المادة الوراثية. هذه التركيبات الجديدة، مع الأخطاء في التركيبات، توفر آليات لنشوء الكائنات الحية التزاوجية. هذه الآليات نفسها غير موجودة في الكائنات الحية اللاتزاوجية. وتعتبر الأخطاء في تضاعف الـ DNA أساسية لنظرية نشوء قابلة للتطبيق من كائنات حية بسيطة أحادية الخلية إلى كائنات حية معقدة متعددة الخلايا.

3.5 ما هي الحياة؟

اكتسبت الحاجة إلى وضع تعريف للحياة ضرورة ملحّة جديدة كلما تعلمت البشرية المزيد عن عملية التكاثر وكلما اتسع بلوغنا إلى

الكواكب الأخرى . كيف سنعرف ما إذا كانت هناك حياة في مكان آخر في الكون إذا كنا لا نعرف كيف نُعرّف الحياة؟ كيف يمكننا أن نثق بالقوانين التي تنظم حقوق التكاثر للإنسان بينما نحن لا نعرف ما هي الحياة؟

الحياة يصعب تعريفها[2]، عرّف ليسلي أورجل (Leslie Orgel) الكيان الحي بأنه «الكيان المعقد المتكاثر الناقل للمعلومات الذي يتطور بالانتقاء الطبيعي» (CITROENS). وأيّ كيان يعتبر كائناً حياً إذا حقق المعايير التالية: الكيان معقد بل ومعرّف تماماً من خلال مادة مثل الـ DNA؛ والكيان يستطيع التكاثر أو أنه منحدر من كيانات تتكاثر.

في أثناء بحثه عن حياة في النظام الشمسي كجزء من برنامج إدارة الفضاء والطيران الوطنية، قدّم نورمان هوروفيتز (Norman Horowitz) تعريفاً للحياة يستند إلى علم الوراثة. يقول هوروفيتز بأن الحياة «مترادفة مع امتلاك الخصائص الوراثية» [هوروفيتز، 1986، ص 13]. وعرّف هوروفيتز خاصيتين وراثيتين هامتين: التضاعف الذاتي، والطفرة. وفي رده على الأسئلة المتعلقة بما أو بمن هو المصمم للكائن الحي، يقول هوروفيتز إن المصمم هو «التأثيرات المتراكمة للانتقاء الطبيعي المؤثرة على الطفرات التلقائية على مدى فترات طويلة من الزمن» [هوروفيتز، 1986، ص 13].

استعرض نعوم لاهاف (Noam Lahav) عدة تعاريف تاريخية للحياة وتبنى وجهة نظر «علمية». قال لاهاف إن الكيانات الحية «معقدة، وإنها تركيبات بعيدة عن الاتزان باقية بتدفق الطاقة من المصادر إلى المصارف» [لاهاف، 1999، ص 113]. ووفقاً لقول لاهاف، فإن الكيانات الحية تستطيع أن تتضاعف، وتتحوّل، وتتبادل المادة والطاقة مع بيئتها، وتتطور.

يجب أن تكون المعايير للحياة صفات مشتركة لدى جميع الكائنات الحية. ويجب على الكيان، لكي يؤخذ في الاعتبار بأنه حي، أن يكون قادراً على التكاثر. وإذا كان الكيان عقيماً جنسياً، كما هو الحال بالنسبة إلى البغال، فيجب على الكيان أن يكون منحدراً من كيانات أخرى تستطيع أن تتكاثر. الأخطاء أو التغيرات الوراثية المصاحبة لعملية التكاثر هي الآليات التي تحدث بواسطتها الطفرات. فالطفرات، بالتالي، ضرورية للنشوء. الخاصية الأخرى السلوكية للكائن الحي هي المقدرة على اكتساب ومعالجة الغذاء. والغذاء في هذا المعنى يمكن أن يكون بسيطاً كالجُزَيئات أو معقداً كالكائنات الحية الأخرى . كما إن الجزء الأساسي من العملية الأيضية، بالإضافة إلى اكتساب ومعالجة الغذاء، هي التخلص من الفضلات. فكل كائن حي يستطيع إفراز الفضلات. والخاصية الأخيرة هي قدرة الكائنات الحية على الاستجابة للمؤثرات الخارجية. وتعتمد درجة الحنكة للاستجابة الفعلية على نوع المؤثر الخارجي وعلى درجة تعقيد الكائن الحي المستجيب.

4.5 التولُّد التلقائي

اعتقد العلماء، في معظم مراحل التاريخ، أن الكائنات غير الحية تختلف إلى حد ما عن الكائنات الحية. كانوا يعتقدون أن الكائنات الحية اشتملت على صفات، مثل الروح أو القدَر، ميّزتها عن الكائنات غير الحية بل وحتى عن البقايا التي كانت يوماً ما كائنات حية. فهل وُهِب الكائن الحي صفات خاصة خارج نطاق متناولنا، أم أننا نستطيع خلق كائنات حية من مواد غير حية؟

لقد وُجد مفهوم التولُّد التلقائي (Spontaneous Generation) ـ خلق كائن حي من مواد غير حية ـ منذ ما قبل عصر الفيلسوف

اليوناني القديم أرسطو. كان أرسطو مؤيِّداً رئيسياً للتولُّد التلقائي. فقد اعتقد أرسطو، على سبيل المثال، بأن الضفادع تكوّنت من الطين. كانت آراؤه مقبولة على نحو واسع على مدى ألفي عام. فجاء الطبيب الإيطالي فرانسيسكو ريدي (Francesco Redi) وشنّ أول هجوم خطير على مفهوم التولُّد التلقائي في عام 1668.

قبل البحث الذي قام به ريدي، كان العلماء يعتقدون بأن الديدان تكونت من تحلل اللحم الأحمر. وضع ريدي قطعة من الشاش المشبك الدقيق على سطح مكشوف لقطعة من اللحم الأحمر. منعت قطعة الشاش بيض الحشرات من الاستقرار على اللحم. وحيث إن بيض الحشرات كانت معزولة عن اللحم لم تتكون الديدان. هذه التجربة لريدي تحدّت صحة مفهوم التولُّد التلقائي. وبحثه كان يمكن أن يكون له أثر أكبر لولا قيام عالِم الطبيعة الهولندي آنتون فان ليوينهوك (Anton van Leeuwenhock) باختراع جديد: المجهر. باستخدام مجهر من تصميمه الخاص، قام ليوينهوك بعمل رسومات دقيقة وتقديم وصف للميكروبات. وقدّم بحثه إلى الجمعية الملكية البريطانية على هيئة سلسلة من الرسائل يعود تاريخها إلى أوائل عام 1674. مشاهدة الميكروبات قادت البعض إلى القول بأن هذه المخلوقات الدقيقة، التي ظهرت فجأة على الطعام المتحلل، تولّدت تلقائياً. فعلى الرغم من أن مفهوم التولُّد التلقائي كان في تراجع، إلا أنه لم يكن قد هُزِم بعد.

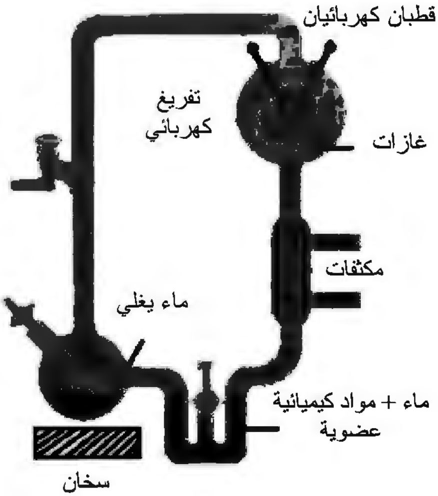
قام عالم الكيمياء الحيوية والأحياء الدقيقة الفرنسي لويس باستور (Louis Pasteur) بتسليم ما كان يعتبر في يوم ما الضربة النهائية للمفهوم الأرسطي للتولّد التلقائي. من خلال سلسلة من التجارب الذكية، برهن باستور أن الميكروبات لن تظهر في الطعام المتحلل ما لم يكن الطعام سهل الوصول بالنسبة إليها أو إلى

مصدرها. ونشر باستور نتائجه في نيسان/ أبريل 1864. والتولُّد التلقائي للكائن الحي، كما كان مفهوماً لدى اليونانيين القدماء، توقف عن أن يكون نظرية قابلة للتطبيق.

ظل مفهوم التولُّد التلقائي كامناً لمدة ستين عاماً. وفي عام 1923، أحيا الكيميائي الحيوي الروسي أوبارين (A. I. Oparin) التولُّد التلقائي ولكن بشكل مختلف. صرّح أوبارين بأن التولُّد التلقائي لا يحدث على الأرض الحديثة، إلا أنه افترض بأن الظروف على الأرض البدائية كانت مختلفة عما هي عليه اليوم. فذهب إلى أن الكائن الحي قد نشأ من المادة غير الحية تحت الظروف السائدة للأرض البدائية. واقترح عالم الوراثة البريطاني هالدين (J. D. S. Haldane) بشكل مستقل فرضية مماثلة. فهل بالإمكان أن يكون الكائن الحي نشأ من المادة غير الحية على الأرض البدائية؟

5.5 تجربة ميلر - يوري

قُدِّمت إحدى أهم الأدلة الداعمة لفرضية التولُّد التلقائي على الأرض البدائية لأوبارين وهالدين قُدِّمت في عام 1953 من قِبَل الكيميائيين الأميركيين ستانلي ميلر (Stanley Miller) وهارولد يوري (Harold Urey). كان ميلر طالب دراسات عليا ليوري عندما أجرى تجربة ذات أهمية كبرى لتطوير نظرية علمية مقبولة عن النشوء. استخدمت تجربة ميلر جهازاً مماثلاً لذلك المبيّن في الشكل (10.5). في الجانب الأيسر السفلي من الشكل توجد قنينة تحتوي على ماء وثلاثة غازات: الهيدروجين، والنشادر، والميثان. هذه الموائع الموجودة في القنينة تشكّل خليطاً يعرف باسم «الحساء ما قبل الحياتية» (Prebiotic Soup). يحتوي الحساء ما قبل الحياتية على المواد غير الحية التي اقترح أوبارين وهالدين بأنها كانت مكونات الغلاف الجوي للأرض قبل ظهور الحياة.



الشكل (10.5): تجربة ميلر ـ يوري

إن جميع مكونات الحساء ما قبل الحياتية ـ الماء، والهيدروجين، والميثان، والنشادر ـ هي مركبات بسيطة نسبياً. بالإضافة إلى ذرّتي الهيدروجين، يحتوي الماء على الأكسجين، ويحتوي النشادر على النيتروجين، ويحتوي الميثان على الكربون. ويمكن للغازات مثل الميثان والنشادر أن تكون قد نُفِيت إلى الغلاف الجوي للأرض البدائية بواسطة النشاط البركاني أو بواسطة التفريغ الغازي الإضافي للقشرة الأرضية. والماء كان موجوداً في محيطات الأرض، كما إن الهيدروجين وُجِد بوفرة في كافة أنحاء الكون.

بالإضافة إلى الحساء ما قبل الحياتية، كانت الأشعة فوق البنفسجية القادمة من الشمس والنشاط البركاني من المصادر الرئيسية للحرارة الموجودة في الغلاف الجوي للأرض. السخان الموجود أسفل القنينة المحتوية على الحساء ما قبل الحياتية يُمثل هذه المصادر الحرارية. عند بدء الماء بالغليان فإنه يتبخر. يختلط البخار الناتج مع

الغازات الأخرى فيقوم بتسخينها. هذه الغازات الساخنة يتم تسييرها لتتدفق خلال المسار المحدد بالأنابيب الزجاجية. وبمجرد أن تختلط الغازات بشكل تام، تصبح خاضعة للتفريغات الكهربائية (الشرر). هذه التفريغات الكهربائية يُفترض أنها تمثل مصادر الطاقة مثل ومضات البرق، وحرارة باطن الأرض، والأشعة المؤيِّنة مثل الأشعة الكونية أو الأشعة فوق البنفسجية التي كانت تنير الأرض البدائية. تتكاثف نواتج هذا النشاط في المكثف المبرَّد بالماء ويعاد دورانها.

بعد تشغيل التجربة لمدة أسبوع، أُطفئت الشرارة وتم تحليل النواتج النهائية. من بين النواتج الكيميائية كانت هناك أربعة أحماض أمينية ناتجة بشكل طبيعي: حمض الجلوماتيك، والجلايسين، والألانين، وحمض الأسبارتيك. بعد نشر نتائج ميلر ـ يوري في عام 1953، أجرى باحثون آخرون تجارب مماثلة. جميع الأحماض الأمينية العشرين الناتجة بشكل طبيعي كان قد تم إنتاجها تحت ظروف ما قبل الحياتية. وقد تم اكتشاف مُنتَج آخر ذي أهمية حيوية: الأدينين (Adenine). والأدينين هو أحد المكوّنات الأساسية للحمض النووي.

إلى جانب إنتاج مواد كيميائية حيوية هامة من جُزَيئات بسيطة تحت ظروف ما قبل الحياتية، فقد أدرك العلماء من خلال الفحوصات التجريبية أنه من غير المحتمل إنتاج الأحماض الأمينية من غلاف جوي مثل الذي نملكه اليوم ـ أي الغلاف الجوي المكوّن من أكسجين، ونيتروجين، وثاني أكسيد الكربون. هذه المشاهدة التجريبية تقدم دليلاً داعماً لتصور أوبارين وهالدين عن الغلاف الجوي للأرض البدائية. وتطوُّر غلاف جوي غني بالأكسجين لم يتم حتى نشأت الكائنات الحية المنتِجة للأكسجين[3]. وبدأ الأكسجين بالتجمع في الغلاف الجوي قبل حوالي بليوني سنة.

وقد لاقت محاولات تصنيع جُزَيئات الكائن الحي من مكونات غير عضوية على الأرض البدائية قد لاقت بعض النجاح[4]. فقد أجرى سيريل بونامبروما (Cyril Ponnamperuma) من جامعة ميريلاند تجارب تحت ظروف الأرض البدائية حيث يتم إنتاج الأحماض الأمينية وربطها مع بعضها لتكوين البوليمرات. وقد بيّن سيدني فوكس (Sydney Fox) من جامعة ميامي بأن هذه البوليمرات تكتسب شكلاً كروياً (تسمى كرات مجهرية أو ميكروسفير (Microsphere)) عند تعريضها لبيئة مائية مشابهة لبركة المد والجزر لدى الشعوب القديمة. وعلى الرغم من هذه النجاحات، إلا أن هناك العديد من الفجوات في فهمنا لآليات النشوء بدءاً من الجُزَيئات البسيطة إلى الكائنات الحية أحادية الخلية. قدّم الكيميائي روبرت شابيرو (Robert Shapiro) تقييماً نقدياً عن المنشأ الجزيئي لنموذج الكائن الحي. العلماء لا يعرفون، مثلاً، كيف نشأت أبسط أغشية الخلية أولاً. كما لم يتمكن أيّ شخص من تصنيع حتى أبسط كائن حي في المختبر. وقد قاد ذلك البعض أيضاً إلى النظر في مصدر آخر محتمل للكائن الحي: مصدر خارج الكرة الأرضية.

يفترض نموذج أوبارين ـ هايدين ـ ميلر ـ يوري أن الغلاف الجوي للأرض البدائية كان يتناقص، أي إن الغلاف الجوي كان غنياً بالهيدروجين. فإذا كان الغلاف الجوي للأرض لا يتناقص، وكان تصور ميلر ويوري خاطئاً، إذاً فمن أين جاء الكائن الحي؟ إحدى الاحتمالات هي نظرية «البذور الكونية»[5] (Panspermia).

نظرية البذور الكونية

تستند نظرية البذور الكونية إلى فرضية أن الكائن الحي أُحضِر إلى الأرض من الفضاء الخارجي. الكيميائي السويدي سفانت

أرينيوس (Svante Arrhenius) (1859-1927) قدّم نظرية البذور الكونية في عام 1908 بسبب عجز العلم لتفسير أصل الحياة في مطلع القرن العشرين. وبحلول منتصف القرن العشرين، اعتقد الناس أن تجربة ميلر ـ يوري قدّمت الآلية اللازمة عن أصل الحياة، إلا أن التساؤلات حول صحتها قد أثيرت في سياق تشكيل بعض نماذج للطائرات. قام كريك وأورجل بإجراء تحسين لمفهوم البذور الكونية، فذهبا إلى أن الكائن الحي على الأرض بُذِر بواسطة حضارة تجوب الفضاء. على الرغم من أن فرضية تناقص الغلاف الجوي التي وضعها ميلر ويوري لم يثبت بطلانها، إلا أن بدائل أخرى ، مثل نظرية البذور الكونية، كانت تؤخذ في الاعتبار بينما يتم تجميع أدلتها. فهل هناك أيّ دليل داعم لنظرية البذور الكونية؟

في 28 أيلول/ سبتمبر 1969 سقط نيزك بالقرب من مدينة مورشيسون بأستراليا. تم تجميع قطع من النيزك وتحليلها بعناية. كشف التحليل عن كميات كبيرة نسبياً من نفس الأحماض الأمينية الطبيعية الناتجة في تجربة ميلر ـ يوري. هذا الاكتشاف، مستنداً أيضاً إلى تحاليل دقيقة جداً صممت للتقليل من إمكانية التلوث الأرضي، أوضح بأن بعض اللبنات الأساسية للكائن الحي موجودة في أماكن أخرى من الكون. نيزك مورشيسون (Murchison)، كما سمِّي، قدّم دعماً إلى أنصار هذا الاعتقاد بأن الكائن الحي على الأرض ربما يكون قد نشأ في مكان ما في الفضاء الخارجي، وأن هناك كائنات حية خارج كوكب الأرض. صخرة أخرى عثر عليها في القطب الجنوبي تم تحديد خصائصها بأنها نيزك من المريخ في عام 1996. وكشفت الدراسة على الصخرة احتواءها على معادن وتركيبات نسبها بعض الباحثين إلى نشاط بيولوجي، ومن المحتمل عندما كانت على المريخ. والتفسيرات البديلة ممكنة ولا تحتاج إلى مثل هذا الاستنباط

من العلوم الطبيعية، إلا أن باحثين آخرين لم يقتنعوا. ولا يزال السؤال عن وجود كائنات حية خارج كوكب الأرض باقياً من دون حل.

معادلة دريك

طوّر فرانك دريك (Frank Drake) من جامعة كورنيل في الخمسينيات من القرن العشرين معادلة لحساب احتمال وجود كائنات حية خارج كوكب الأرض. من الجدير أيضاً النظر في إمكانية وجود كائنات حية خارج كوكب الأرض بدراسة معادلة دريك بمزيد من التفاصيل. هذا المسعى مُبرَّر بدراسة الطاقة لأن العديد من مصادر الطاقة التي سنناقشها في الفصول اللاحقة منشؤها الكائنات الحية أو تحلل الكائنات الحية. وإذا كانت هناك كائنات حية أو قد وُجدت حياة على كواكب أخرى ، فإن هناك أيضاً إمكانية للعثور على مصادر طاقة مترافقة مع الكائنات الحية.

إن معادلة دريك هي [تريفل (Trefil)، 1985، ص 171؛ وشيرمر (Shermer)، 2002]:

$$N = R\, f_P\, n_E\, f_L\, f_I\, f_C\, L \qquad (5.5.1)$$

إن معاني المتغيرات في المعادلة (5.5.1) موضحة في الجدول (2.5). واعتماداً على تحيّزك الخاص، يمكنك استخدام معادلة دريك لتبيّن بأن الحياة خارج كوكب الأرض محتملة وغير محتملة. أستاذ آخر من جامعة كورنيل، الفلكي كارل ساغان (Carl Sagan)، استخدم شكلاً مختلفاً لمعادلة دريك ليبيّن بأن الحياة خارج كوكب الأرض محتملة [ساغان، 1980، ص 299-302]. واستخدم باحثون آخرون أشكالاً مختلفة لمعادلة دريك ليجادلوا بأن الحياة على سطح الأرض نادرة[6].

الجدول (2.5) المتغيرات في معادلة دريك

المتغير	المعنى
N	عدد الحضارات الذكية
R	معدل تشكّل النجوم في السنة ($year^{-1}$)
f_P	الجزء من النجوم التي بكواكب
n_E	عدد الكواكب في المنطقة الصالحة للسكن من النجم
f_L	الجزء من الكواكب الصالحة للسكن حيث تظهر الحياة
f_I	الجزء من الكواكب التي بحياة ذكية
f_C	الجزء من زمن الحياة للكوكب الذي يتضمن حضارات يمكنها أو ستتمكن من التواصل
L	المدة الزمنية (بالسنوات) التي تتواصل فيها الحضارة

لقد جادل بيتر وازد (Peter Ward) ودونالد براونلي (Donald Brownlee) بأن احتمال إيجاد كائنات حية جرثومية في أي مكان آخر في الكون ربما يكون عالياً، إلا أن احتمال إيجاد أشكال لكائنات حية أكثر تعقيداً سيكون منخفضاً. واقترح وازد وبراونلي معادلة بديلة لمعادلة دريك [2000، ص 270] نكتبها على الصورة التالية:

$$N = N_{MW} f_S f_P n_E f_L f_C f_I \qquad (5.5.2)$$

معاني المتغيرات الموجودة في المعادلة (5.5.2) موضحة في الجدول (3.5). لاحظ أن وازد وبراونلي قد تراجعا عن تقدير عدد الكواكب التي بحضارات ذكية، ويعتقدان أن من الأجدر السؤال عن عدد الكواكب الملائمة لنشوء كائنات حية معقدة متعددة الخلايا، سمّياها ميتازوان (Metazoans).

الجدول (3.5) المتغيرات في معادلة وازد ـ براونلي

المتغير	المعنى
N	عدد الكواكب التي بكائنات حية معقدة متعددة الخلايا
N_{MW}	عدد النجوم في مجرة درب التبانة
f_S	الجزء من النجوم الملائمة لدعم الحياة (الشبيهة بالشمس)
f_P	الجزء من النجوم التي بكواكب
n_E	عدد الكواكب في المنطقة الصالحة للسكنى من النجم
f_L	الجزء من الكواكب الصالحة للسكنى حيث تظهر الحياة
f_C	الجزء من الكواكب التي بكائنات حية معقدة متعددة الخلايا
f_I	الجزء من زمن الحياة للكوكب الذي يتضمن كائنات حية معقدة متعددة الخلايا

من السهل فهم المتغيرات في المعادلتين (1.5.5) و(2.5.5) من الناحية النظرية، إلا أنها تتطلب وضع تقديرات للكميات التي هي غير معروفة جيداً. لتوضيح مدى عدم اليقين، قال ساجان [1980، ص 299] بأن عدد النجوم في مجرة درب التبانة تقريباً 4×10^{11}. وبعد سنتين، قال وازد وبراونلي [2000، ص 267] بأن عدد النجوم في مجرة درب التبانة تقريباً 3×10^{8}. نلاحظ أن التقديرين يختلفان بمقدار 1000. ومن المفترض أن التقدير الأحدث أيضاً هو التقدير الأكثر دقة. إذا كان الأمر كذلك، فإنه يمثل انخفاضاً كبيراً في إمكانية نشوء أشكال لكائنات حية معقدة في أماكن أخرى في المجرة. والمتغيرات الأخرى في معادلة دريك هي أيضاً أكثر صعوبة لتحديد مقادير لها على وجه الدقة. هذه الشكوك تفسر سبب التفاوت في تقديرات N من ملايين إلى مقدار ضئيل. ما يمكننا القول هو إن لبنات البناء الأساسية للكائن الحي، مثل الجُزَيئات العضوية البسيطة كالميثان، غير موجودة في الفضاء وربما تدعم

وجود شكل من أشكال الحياة على الأجرام السماوية الأخرى بالإضافة إلى الأرض.

حتى وإن وجدت حياة خارج كوكب الأرض، فإنها لا تُثبت بأن الحياة على الأرض تم نقلها إلى هنا بواسطة بذرة على نيزك أو بواسطة مخلوقات غريبة تجوب الفضاء. والجدل في أن الحياة على الأرض نشأت في مكان ما في الفضاء الخارجي لا يحل مشكلة أصل الحياة؛ بل يقوم بتحويلها من الأرض إلى الفضاء الخارجي. وبما أنه توجد أدلة واهية عن منشأ الحياة خارج كوكب الأرض، فإن التصور المقبول لا يزال هو منشأ الحياة من الحساء ما قبل الحياتية.

الانتقالات إلى كائن حي

حدد ريتشارد كووين (Richard Cowen) عدداً من الشروط التي اعتبرها ضرورية لمنشأ الكائن الحي[7]. تم الاحتياج إلى الطاقة لتكوين جُزَيئات عضوية معقدة. بمجرد تكوّنها، تحتاج الجُزَيئات العضوية المعقدة إلى حماية من الأشعة القوية لمنع تفكك الجُزَيء. العديد من الأوساط، مثل الماء، أو الثلج، أو الصخور، يمكن أن توفر هذه الحماية. المواد الكيميائية المطلوبة للكائن الحي يجب أن تكون مركَّزة. وهذا يمكن أن يتم، على سبيل المثال، في بركة من الماء الذي يتبخر بعد أن تكون المواد الكيميائية للكائن الحي قد تشكّلت. وأخيراً، يتم الاحتياج إلى مواد حفازة لتسهيل التفاعلات الكيميائية المطلوبة لمنشأ الكائن الحي. الإنزيمات هي المواد العضوية الحفازة.

الجدول (4.5) ملخص الانتقال إلى كائن حي

الخطوة	الكيان
1	مواد كيميائية غير عضوية
2	مواد كيميائية عضوية
3	الحمضان النوويان والبروتينات
4	بدائيات النوى (prokaryotes) (لا توجد نواة؛ على سبيل المثال البكتيريا)
5	حقيقيات النوى (eukaryotes) (حمض نووي في النواة؛ على سبيل المثال الأميبا)

يلخّص الجدول (4.5) تسلسل نشوئي مقبول لتطور الكائن الحي من مواد كيميائية غير عضوية. ويصور الجدول ازدياد مستوى التعقيد الكيميائي مع انتقالنا من المواد الكيميائية غير العضوية إلى أبسط الكائنات الحية أحادية الخلية. بشكل عام، يُعتقد بأن البكتيريا هي أبسط أشكال الكائنات الحية لأن البكتيريا تحتوي على كلٍّ من الـ DNA وRNA. وكما رأينا سابقاً، فإن مضاعفة الـ DNA يتطلب وجود الـ RNA كوسيط. ووجود كل من الـ DNA وRNA في البكتيريا يعني أن البكتيريا يمكن أن تتكاثر من دون أيّ مساعدة خارجية. أما الفيروسات فلا تستطيع أن تتكاثر من دون مساعدة كائن حي مضيف لأنها تحتوي فقط على الـ DNA أو الـ RNA. وليس واضحاً ما إذا أدت الفيروسات دوراً في تطوير الكائنات الحية أحادية الخلية الأولى . ويعتقد علماء الأحياء بشكل عام أن التسلسل الارتقائي المبيّن في الجدول (4.5) سليم تماماً.

يمكن تكبير مجموعة الخطوات المبيّنة في الجدول (4.5) بسهولة كلما أضيفت تفاصيل أخرى وأخذنا في الاعتبار كائنات حية

أكثر تعقيداً. على سبيل المثال، حدد سميث وزاثماري (Smith and Szathmáry) [1999، ص 16-19] ثمانية انتقالات رئيسية ضرورية للتحرك من الخطوة 3 في الجدول (4.5) إلى المجتمع البشري. ويمكن تلخيص انتقالاتهما كما يلي:

- **الانتقال 1**: تتحد الجُزَيئات المتضاعفة لتكوين مجموعات من الجُزَيئات في حجرة صغيرة (حجيرة). تصبح الحجيرة المحتوية على الجُزَيئات المتضاعفة خلية أولية.

- **الانتقال 2**: ترتبط الجُزَيئات المتضاعفة بشكل مستقل مع بعضها لتشكُل سلاسل تصبح كروموزومات.

- **الانتقال 3**: يقوم الحمضان النوويان (DNA وRNA) الآن بخزن ونقل المعلومات الوراثية، بينما تقوم البروتينات بتحفيز التفاعل الكيميائي. هذه العملية معقدة ويجب أن تكون قد نشأت من عملية أبسط والتي تكون فيها جُزَيئات مثل RNA قد أنجزت وظائف كل من الجين والإنزيم. وعند نقطة معينة في التسلسل النشوئي، يجب أن يكون قد تم تقسيم العمل.

- **الانتقال 4**: الخلايا البكتيرية البسيطة نسبياً تطوّرت إلى خلايا بنوى وتركيبات أحادية الخلية تسمى عضيات (Organelles). الميتوكوندريا والبلاستيدات الخضراء هي من الأمثلة على العضيات. وهذا الانتقال هو الانتقال من الخطوة 4 إلى الخطوة 5 في الجدول (4.5) ـ أي إن بدائيات النوى ارتقت إلى حقيقيات النوى.

- **الانتقال 5**: ترتقي الاستنساخات اللاتزاوجية إلى مجموعات من الخلايا النشيطة تزاوجياً.

- **الانتقال 6**: ترتقي الكائنات الحية ذات الخلية الواحدة إلى حيوانات، ونباتات، وفطريات متعددة الخلايا.

● **الانتقال 7**: تقوم كل من الكائنات الحية على حدة بتشكيل مستعمرات.

● **الانتقال 8**: ترتقي مجتمعات الرئيسيات (Primates) إلى مجتمعات بشرية وتنشأ اللغة.

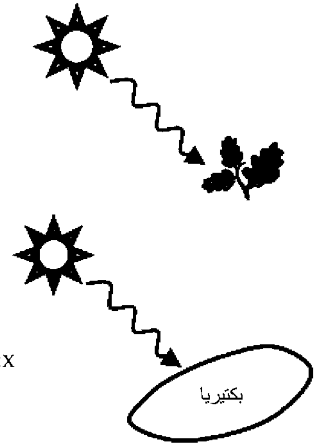
هذه المجموعة للانتقالات ليست فريدة، وهذا هو السبب في وصف سميث وزاثماري للانتقالات بأنها «رئيسية». يتطلب العديد من الانتقالات الأخرى لتحقيق الانتقالات الرئيسية، ويتيح لنا التعبير «ترتقي» التحرك من خطوة إلى أخرى من دون المعرفة الحقيقية بكل تفاصيل عملية الانتقال.

6.5 التمثيل الضوئي

تحتاج الكائنات الحية إلى شيئين من بيئتها: الطاقة، والمواد الكيميائية [ميهيلشيك (Mihelcic)، 1999، القسم 3.5]. تُستخدم الطاقة لتوفير القدرة وتُستخدم المواد الكيميائية لتوفير المادة، مثل الغذاء لتغذية الكائن الحي. ويتم تدوير العناصر الكيميائية خلال نظام بيئي، إلا أن الطاقة تُستخدم وفي نهاية المطاف تُبدد كحرارة.

يتم توفير الطاقة المطلوبة للعمليات الكيميائية الحيوية بواسطة تحلل الجُزَيئات العضوية البسيطة نسبياً مثل السكر والدهون. وعلى المستوى الجوهري، فإن مصدر الطاقة الرئيسي للمحيط الحيوي كاملاً هو الشمس. تعتبر الشمس غالباً المصدر الأساسي للطاقة المستخدمة بواسطة جميع الكائنات الحية على الأرض. والشمس قد تكون إما مصدر الطاقة المباشر أو غير المباشر للكائنات الحية على سطح الأرض. وقد اقترح جولد (Gold) [1999] أن المحيط الحيوي يوجد ضمن الأرض التي تتلقى الطاقة من النشاط الإشعاعي والحرارة من باطن الأرض.

يتم تحويل ضوء الشمس، أو الطاقة الكهرومغناطيسية القادمة من الشمس، إلى مصادر طاقة حيوية مفيدة، مثل الطاقة الكيميائية، بواسطة التمثيل الضوئي. سنأخذ نوعين من التمثيل الضوئي: التمثيل الضوئي للنبات الأخضر، والتمثيل الضوئي البكتيري. هاتان العمليتان للتمثيل الضوئي موضحتان في الشكل (11.5).



أ- التمثيل الضوئي للنبات

$$CO_2 + H_2O \xrightarrow[\text{كلوروفيل}]{\text{فوتون +}} C(H_2O) + O_2$$

ب- التمثيل الضوئي البكتيري

$$CO_2 + 2H_2X \xrightarrow[\text{بكتيريا}]{\text{فوتون +}} C(H_2O) + H_2O + 2X$$

الشكل (11.5): التمثيل الضوئي

ويتم التمثيل الضوئي في أغشية البلاستيدة الخضراء. وتقوم صبغات النبات، خاصة الكلوروفيل، بتحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كيميائية من خلال عملية التمثيل الضوئي للنبات المبيّنة في الشكل (11.5) (أ). الكلوروفيل هو خليط من مركّبين يعرفان بالكلوروفيل a والكلوروفيل b. هذان المركّبان للكلوروفيل هما مثالان على المواد الكيميائية لحسّاس الضوء (Photosensitive). وخلايا النبات التي تحتوي على الكلوروفيل تكون خضراء لأن خليط الكلوروفيل يعكس الضوء الأخضر. عندما يقوم جزيء حسّاس الضوء بامتصاص الضوء، ترتفع الإلكترونات الموجودة في الجُزَيء إلى مدار طاقة أعلى حيث تكون أقل ترابطاً ويمكن أسرها

بواسطة جُزَيئات أخرى . وإذا فقد الكلوروفيل هذه الإلكترونات الطاقية، فإنه يستبدلها بجُزَيئات الماء المتفككة. تتحد ذرتا الأكسجين الناتجة من تفكك جزيئين من الماء لتكوين أكسجين ثنائي الذرّة كغاز O_2. ويقوم تفاعل التمثيل الضوئي بتحويل الماء وثاني أكسيد الكربون إلى سكر وأكسجين. التعبير $C(H_2O)$ يمثل جُزَيئات عضوية بالصيغة العامة $C_nH_{2n}O_n$ مثل سكر الجلوكوز. والجلوكوز له الصيغة $C_6H_{12}O_6$ ويماثل $6 \times C(H_2O)$.

كفاءة تحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كيميائية بواسطة التمثيل الضوئي هي حوالي 14 في المئة [سورينسن، 2000، ص 300-302]. هذه الكفاءة الكلية تمثل جزء الترددات في الطيف الشمسي التي يمكن استخدامها في التمثيل الضوئي، وكفاءة تجميع الأشعة الكهرومغناطيسية الساقطة من الشمس، وكفاءة العملية الكيميائية التي تقوم بتحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كيميائية.

تفاعلات التنفس والأكسدة والاختزال

تقوم عملية التمثيل الضوئي بتحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كيميائية مخزونة. وتقوم عملية التنفس بتحويل الطاقة الكيميائية المخزونة إلى طاقة يمكن استخدامها بواسطة الكائن الحي. وتتفاوت كفاءة عملية التنفس من 5 في المئة إلى 50 في المئة [ميهيلشيك، 1999، ص 238].

إن التنفس هو عملية أكسدة واختزال (Redox). في عملية الأكسدة والاختزال، يقوم مانح الإلكترون بنقل إلكترون واحد أو أكثر إلى متقبل الإلكترون. يتأكسد مانح الإلكترون ويصبح مدار تكافئه موجباً. أما متقبل الإلكترون فيختزل ويصبح مدار تكافئه سالباً. في أثناء عملية التنفس، تفقد ذرّات الكربون إلكترونات وتصبح

مؤكسدة بينما تتقبل ذرات الأكسجين إلكترونات وتصبح مختزلة.

تفاعل الأكسدة والاختزال في عملية التنفس يمكن اعتباره عملية مكوّنة من خطوتين. الخطوة **الأولى هي** تفاعل الأكسدة ويمكن كتابتها على الصورة التالية:

$$C(H_2O) + H_2O \rightarrow CO_2 + 4H^+ + 4e^- \qquad (5.6.1)$$

تنطلق الإلكترونات الأربعة عندما يتغير مدار التكافؤ للكربون من 0 في جزيء الهيدروكربون إلى +4 في ثاني أكسيد الكربون. والخطوة **الثانية** في تفاعل الأكسدة والاختزال هي تفاعل الاختزال ويمكن كتابتها على الصورة التالية:

$$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O \qquad (5.6.2)$$

في هذه الخطوة، تقوم الإلكترونات الأربعة التي انطلقت من تفاعل الأكسدة بتغيير مدار التكافؤ للأكسجين من 0 في جزيء الأكسجين إلى 2 في جزيء الماء. أما التفاعل المكوّن من الأكسدة والاختزال فيمكن كتابته على الصورة التالية:

$$C(H_2O) + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O + \varepsilon_{redox} \qquad (5.6.3)$$

حيث ε_{redox} هي الطاقة المنطلقة في أثناء التفاعل. وعلى الرغم من أن عدد الإلكترونات غير متغير، إلا أن التوزيع الإلكتروني متغير.

التمثيل الضوئي البكتيري

ليست النباتات هي الكائنات الحية الوحيدة التي تستطيع تحويل ضوء الشمس إلى طاقة كيميائية نافعة. فبعض الأنواع من البكتيريا يمكنها استخدام ضوء الشمس لتفكيك مركبات من الصورة H_2X بواسطة التفاعل المبيّن في الشكل (11.5) (ب). تستطيع بكتيريا

الكبريت، مثلاً، تفكيك كبريتيد الهيدروجين H_2S، وتستطيع بكتيريا التخمر تفكيك الإيثانول C_2H_5OH. ومعظم بكتيريا التمثيل الضوئي تستطيع امتصاص الضوء في منطقة الأشعة تحت الحمراء [سورينسن، 2000، ص 302]. ومنطقة الأشعة تحت الحمراء لها أطوال موجية تتراوح من 800×10^{-9} إلى 1000×10^{-9} متر ويصاحبها طاقة حرارية.

الاختلاف الهام بين التمثيل الضوئي للنبات والتمثيل الضوئي البكتيري يكمن في طريقة استخدام الطاقة الضوئية المحوّلة. التمثيل الضوئي للنبات يحوّل الطاقة الضوئية إلى طاقة كيميائية مخزونة ليتم استخدامها في ما بعد في التنفس. وعلى العكس من ذلك، يستهلك التمثيل الضوئي البكتيري معظم الطاقة الضوئية ولا يخزن الكثير من الطاقة المحوّلة كطاقة كيميائية.

وقد تم التمييز بين عمليتين للتنفس في التمثيل الضوئي البكتيري. عملية التنفس الهوائي التي تستهلك الأكسجين الجزيئي O_2، وعملية التنفس اللاهوائي التي لا تستخدم الأكسجين. البكتيريا اللاهوائية يمكنها استخدام متقبلات الإلكترون مثل النترات (NO_3)، أو المنغنيز (Mn^{4+})، أو أيون الحديديك (Fe^{3+}) بدلاً من الأكسجين [ميهيلشيك، 1999، ص 239].

يمكن فهم دور البكتيريا اللاهوائية في صناعة الطاقة يمكن فهمه فقط بشكل جزئي. تستطيع البكتيريا اللاهوائية هضم البوليمرات ـ سلسلة طويلة من الجُزَيئات العضوية ـ النافعة لإنتاج النفط. ويعتبر هذا تأثيراً سلبياً بسبب التكاليف المصاحبة لحقن البوليمر. من الناحية الأخرى ، النظرية الرئيسية لتكوين النفط والغاز هي نظرية للتحلل الحيوي. والبكتيريا اللاهوائية قد تساهم في فرضية ربما تكون تحدّياً لهذه النظرية: وهي الفرضية التي تقول بأنه يوجد محيط حيوي عميق وحار في الأرض [جولد، 1999]. سنناقش هذه الأفكار في القسم التالي.

7.5 منشأ الوقود الأحفوري

إن الوقود الأحفوري هو مصادر الطاقة التي تكوّنت عن طريق موت، وانحلال، وتحوّل، أو تحوير الكائنات الحية[7]. والتعبير «تحوير» (Diagenesis) يشمل التغيرات الفيزيائية والكيميائية التي ترافق التحجر (Lithification) والتراصّ (Compaction). ويمكن للراسب أن يتحجر، أو يصبح صخرياً، بانتقال المعادن إلى داخل الفراغات المسامية الرسوبية. كما يمكن للمعادن أن تكوّن الإسمنت الذي يربط حُبَيبات الرواسب مع بعضها على شكل تركيب صخري له مسامية أقل من الراسب الأصلي في عملية تسمّى السمنتة (Cementation). والتراص هو عملية استعمال الضغط لضغط التركيب الصخري.

يستند معظم سيناريو نشوء الكائن الحي الذي قُدّم حتى الآن إلى المشاهدات التجريبية. وعلى الرغم من أن هذه المشاهدات تم تأسيسها بإحكام، إلا أن تفسيرها ليس كذلك. وتفسيرها هو تفسير للمشاهدات والقفزات الفكرية عبر فجوات في الدليل المتعلق بالمشاهدة والتي تعتبر مصدر الخلاف الرئيسي بين النظريات العلمية المتنافسة. نقوم في هذا القسم بتوضيح مصدر الخلاف وذلك بالنظر في نظريتين عن منشأ الوقود الأحفوري: نظرية النشوء الحيوي (Biogenic Theory)، ونظرية النشوء التلقائي (Abiogenic Theory).

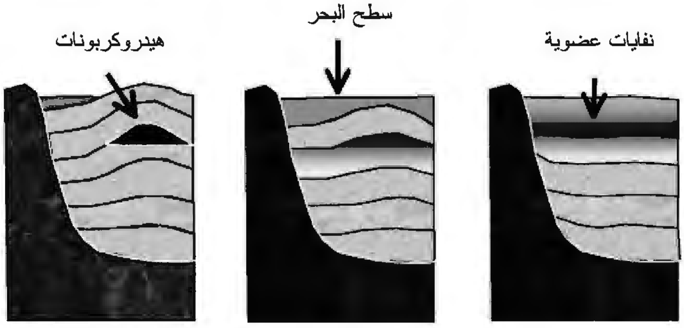
نظرية النشوء الحيوي

إن نظرية النشوء الحيوي هي الرأي العلمي السائدة لمنشأ الوقود الأحفوري. في نظرية النشوء الحيوي، يقوم نوع من الترسيب الكيميائي الحيوي، يُسمّى الترسيب العضوي، بتكوين الفحم الحجري، والنفط، والغاز. عندما يموت النبات ويتحلل في بيئات مائية مثل المستنقعات، فإنه يستطيع تكوين مادة عضوية غنية

بالكربون تسمى الخث (Peat). إذا دفِن الخث من خلال نشاط جيولوجي متتابع، يصبح الخث المدفون خاضعاً لدرجة حرارة وضغط متزايدين. ويمكن للخث في النهاية أن يتحول إلى فحم حجري بواسطة عملية التحوير. ويعتقد بأن عملية تحوير مماثلة هي منشأ النفط والغاز.

إن النفط والغاز من الموائع البترولية. والمائع البترولي هو خليط من جُزَيئات الهيدروكربون وشوائب غير عضوية، مثل النيتروجين، وثاني أكسيد الكربون، وكبريتيد الهيدروجين. ويمكن للبترول أن يوجد في صورة صلبة، أو سائلة، أو غازية، وهذا يعتمد على تركيب ودرجة حرارة وضغط الوسط المحيط بها. والغاز الطبيعي هو عادة الميثان مع كميات أقل من جُزَيئات الهيدروكربون الثقيلة مثل الإيثان والبروبان. والمحتوى الكتلي لعنصري الموائع البترولية يتراوح تقريباً بين 84 في المئة إلى 87 في المئة كربون و11 في المئة إلى 14 في المئة هيدروجين، مقارنة بمحتوى الكربون والهيدروجين للكائن الحي. وهذا دليل واحد على منشأ البترول من المصادر الحيوية.

والعملية الكيميائية الحيوية لتكوّن البترول موضّحة في الشكل (12.5). تبدأ العملية مع موت الكائنات الحية المجهرية مثل الطحالب والبكتيريا. تستقر بقايا الكائنات الحية كنفايات عضوية في الترسبات عند القاعدة من بيئة مائية. قيعان البحيرات وقيعان البحار هي أمثلة على البيئات الرسوبية الملائمة. الترسيب المتتالي يؤدي إلى دفن النفايات العضوية. ومع استمرار الدفن، تكون المادة العضوية خاضعة لدرجة حرارة وضغط متزايدين، وتتحول بواسطة التأثير البكتيري إلى نفط وغاز. والموائع البترولية عادة أقل كثافة من الماء ولهذا ستنزح نحو الأعلى إلى أن تقابل حواجز غير منفَّذة فتتجمع في مصائد. وتجمُّع الهيدروكربون في مصيدة جيولوجية يصبح مكمناً بترولياً.



الشكل (12.5): النشوء الحيوي للنفط والغاز

نظرية النشوء التلقائي

في نظرية النشوء الحيوي، يبدأ منشأ النفط والغاز بموت الكائنات الحية التي تعيش على أو بالقرب من سطح الأرض. الفرضية البديلة لهذه النظرية تسمّى نظرية النشوء التلقائي والتي تقول بأن هناك عمليات داخل باطن الأرض، في وشاح الأرض، تقوم بتكوين البترول. توماس جولد (Thomas Gold)، أحد مؤيّدي نظرية النشوء التلقائي، أشار إلى أن نظرية النشوء الحيوي تم تبنّيها في السبعينيات من القرن التاسع عشر. في ذلك الوقت، كان العلماء يعتقدون بأن الأرض تشكّلت من الصخور المنصهرة التي كانت في الأصل جزءاً من الشمس. في عام 1846، قام اللورد كلفن (أو وليام تومسون (Lord Kelvin) (William Thomson) بتقدير عمر الأرض من معدل برودة الصخور المنصهرة بأنها حوالي 100 مليون سنة. واكتشاف الفيزيائي الفرنسي أنطوان هنري بيكريل (Antoine Henri Becquerel) للنشاط الإشعاعي في عام 1896 وفّر وسائل لتقدير عمر الأرض من تركيز المواد النشيطة إشعاعياً المعمّرة طويلاً في الصخور. وفي عام 1905، اقترح إرنست رذرفورد (Ernest Rutherford)

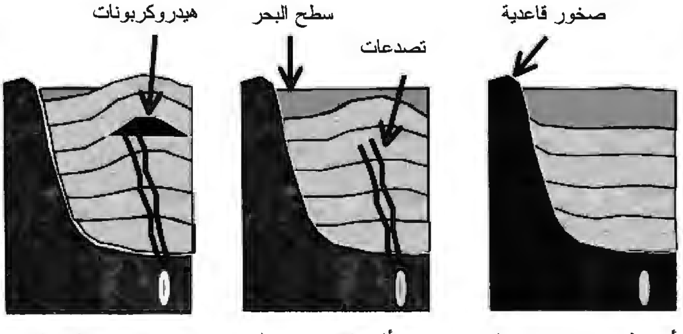
استخدام النشاط الإشعاعي لحساب عمر الأرض. ويعتقد الآن بأن عمر الأرض أكثر من أربعة بلايين سنة.

يعتقد العلماء الآن بأن الأرض تشكّلت بواسطة تراكم وضغط المواد السديمية الباردة، بما في ذلك الجُزَيئات العضوية البسيطة. ويجادل جولد بأن الجُزَيئات العضوية وغير العضوية البسيطة في الأرض الملتحمة كانت خاضعة لحرارة وضغط متزايدين، وفي نهاية المطاف تكوّنت جُزَيئات أكثر تعقيداً. ومؤيّدو نظرية النشوء التلقائي ينظرون إلى باطن الأرض كبوتقة لتكوين الكائن الحي. ووفقاً لوجهة النظر هذه، يمكن اعتبار تجربة ميلر ـ يوري نموذجاً للظروف الموجودة في وشاح الأرض. والتفريغ الكهربائي الذي يمثل البرق في تجربة ميلر ـ يوري يمكن اعتباره مصدر حرارة في نظرية النشوء التلقائي.

يدحض جولد [1999] التحدّيات لنظرية النشوء التلقائي ويقدّم عدداً من الأدلة الداعمة لنظرية النشوء التلقائي، وإمكانية وجود تجمع حيوي في باطن الأرض. بعض أدلة جولد تتضمن وجود مجموعات ميكروبية يمكن أن تزدهر في الحرارة الشديدة. هذه الميكروبات، خاصة البكتيريا والميكروبات العتيقة، تنمو عند المتنفسات العميقة الحارة للمحيط ويمكنها أن تتغذى على الهيدروجين، وكبريتيد الهيدروجين، والميثان. ويفترض جولد بأن أشكال الكائنات الحية عند المتنفسات العميقة للمحيطات هي أشكال الكائنات الحية الانتقالية التي توجد عند السطح الفاصل بين محيطين حيويين.

إن أحد المحيطين الحيويين هو المحيط الحيوي السطحي ويشتمل على الكائنات الحية التي تعيش على القارات وفي البحار على القشرة الأرضية. ويفترض جولد بأن المحيط الحيوي الثاني يوجد في وشاح الأرض. يسمي جولد هذا المحيط الحيوي الثاني

بالمحيط الحيوي العميق. يستخدم المحيط الحيوي السطحي الطاقة الكيميائية المستخلصة من الطاقة الشمسية، لكن المحيط الحيوي العميق يتغذى مباشرة على الطاقة الكيميائية. والأكسجين متطلب في كلا المحيطين الحيويين. المحيط الحيوي العميق الذي افترضه جولد هو مصدر الكائن الحي الذي يقوم في النهاية بتكوين خليط الهيدروكربون، أو البترول، في وشاح الأرض. ومكامن النفط والغاز عند القشرة الأرضية تتكوّن بنزوح المائع البترولي نحو الأعلى حتى يتم إيقافه بواسطة حواجز غير منفذة فيتجمع في مصائد جيولوجية. نظرية النشوء التلقائي موضحة في الشكل (13.5). إذا كانت نظرية النشوء التلقائي صحيحة، فإن التقديرات الموجودة لحجم البترول، والتي تفترض بأن البترول مصدر محدود واقع في القشرة الأرضية، قد قُدِّرت على نحو أقل بكثير من الواقع.



الشكل (13.5): النشوء التلقائي للنفط والغاز

تعليقات ختامية

1- يمكن الحصول على شرح لعلم الأحياء الأساسية في مصادر مختلفة، مثل كيمبال (Kimball) [1968]، وأتّينبورو [1979]

(Attenborough)، وآرمز وكامب [1982] (Arms and Camp)، ووالاس (Wallace) [1990]، وبورفيز وآخرون (Purve [et al.]) [2001].

2 ـ عدد من المؤلفين اقترح تعريفاً للكائن الحي. سنأخذ في الاعتبار التعاريف المقدمة من أورجل (Orgel) [1973، ص 193]، وهوروفيتز (Horowitz) [1986، ص 13]، ولاهاف (Lahav) [1999، ص 113]، وسميث وزاثماري (Smith and Szathmáry) [1999، ص 3] كأمثلة نموذجية. ويقدّم لاهاف [1999] عدة تعاريف للكائن الحي في الملحق A من كتابه (ص 117-121).

3 ـ مور (Moore) [1971]، وفولسوم (Folsom) [1979]، وغولد (Gould) [1993، 2002]، وريدلي (Ridley) [1996]، وبورفيز وآخرون [2001] هي مراجع أساسية لمعظم المواضيع المتعلقة بالنشوء. ويمكن الحصول على آراء داروين (Darwin) مباشرة من كتاباته [للطبعات المعادة، انظر داروين، 1952 و1959].

4 ـ يقدّم براكمان (Brackman) [1980] شرحاً رائعاً في كتابه الحالة الغريبة لتشارلز داروين وألفريد رسل والاس (*The Strange Case of Charles Darwin and Alfred Russel Wallace*). يجادل براكمان بأن والاس لقي ثقة أقل من التي استحقها بسبب علاقة داروين بالمؤسسة العلمية في زمانه.

5 ـ انظر وينشستر (Winchester) [2001] لشرح أحدث.

6 ـ انظر غولد (Gould) [1989].

7 ـ للمزيد من المناقشة عن تكوّن الوقود الأحفوري، انظر سيللي (Selley) [1998، الفصل 5] وجولد (Gold) [1999، خصوصاً الفصل 3]. والمصطلحات الجيولوجية موضحة أيضاً في سيللي

[1998]، وبريس وسيفر (Press and Siever) [2001]. للشرح المتعلق بتاريخ عمر الأرض، انظر هيلمان (Hellman) [1998، الفصل 6]، وبريس وسيفر [2001].

تمارين

1.5 قوة محافظة $\vec{F}$ يمكن حسابها من طاقة الجهد V باستخدام العلاقة $\vec{F}=-\Delta V$ احسب مقدار قوة كولوم من جهد كولوم في المعادلة (5.1.1).

2.5 قوة محافظة $\vec{F}$ يمكن حسابها من طاقة الجهد V باستخدام العلاقة $\vec{F}=-\Delta V$. احسب مقدار القوة النووية من جهد يوكاوا في المعادلة (5.1.2).

3.5 افترض أن المدى للقوة النووية يساوي قطر النواة، وقطر النواة هو 1.2×10 m. استخدم قيمة المدى والمعادلة (5.1.4) لتقدير كتلة الجُسَيم المتبادل.

4.5 افترض نواة بشحنة Zq وإلكترون واحد. من الأمثلة تتضمن أيون الهيليوم He^+ فيه $Z = 2$ أو أيون الليثيوم وفيه $Z = 3$. ما هي طاقة الفوتون المشع عندما يعمل الإلكترون انتقالاً من المدار (أو الحالة) i إلى المدار j؟ **تلميح**: أعد حساب نموذج بوهر مع تعديل جهد كولوم بالشحنة Zq للنواة.

5.5 أ) قام آبيل وآخرون (Abell, [et al.]) [1991، القسم 4.28] بعمل «التقديرات التفاؤلية» التالية للمتغيرات في معادلة دريك: R تساوي 10 لكل سنة (year)، و$f_P = 1$، و$n_E = 1$، و$f_L = 1$، و$f_I = 0.01$، و$f_C = 0.1$. احسب قيمة N عندما L تساوي 100 سنة، وعندما L تساوي 10^6 سنة.

ب) **يقول وازد وبراونلي** [2000، ص 268] إن 0.06. n_E احسب

قيمة N عندما L تساوي 100 سنة، وعندما L تساوي 10^6 سنة.

6.5 ما مقدار الطاقة التي يتم امتصاصها في أثناء التمثيل الضوئي البكتيري من فوتون الأشعة تحت الحمراء بطول موجي 1×10 m = 1 micron = λ؟ افترض أنه تم امتصاص 100 في المئة من طاقة الفوتون.

7.5 افترض أن كفاءة التمثيل الضوئي هي تقريباً 14 في المئة. كم فوتوناً من الأشعة تحت الحمراء بطول موجي 0.8×10 m = 0.8 micron = λ يجب امتصاصه للحصول على 1 J من الطاقة؟

8.5 أ) افترض أن حيوان حقلي كتلته 750 kg يأكل 1 kg من الطعام في اليوم لكل 50 kg من كتلة جسمه. فما مقدار الطعام (بالكيلو غرام لكل يوم (kg/day)) الذي يحتاج إليه هذا الحيوان الحقلي كل يوم؟

ب) احسب الطاقة الغذائية المستخدمة لكل يوم بواسطة هذا الحيوان الحقلي إذا كان المحتوى الطاقي للطعام هو 16 MJ/kg.

ج) إذا كان الشغل المبذول بواسطة هذا الحيوان الحقلي يمكن أن يساعد على إطعام 10 أشخاص، فما مقدار الطاقة لكل شخص لكل يوم المقدمة بواسطة الحيوان؟

9.5 ما هي طاقة الضوء الأزرق ذات طول موجي 475 nm؟ عبّر عن إجابتك بالجول (J).

10.5 احسب الطول الموجي لإلكترون سرعته $0.01c$ حيث c هي سرعة الضوء.

الفصل السادس

الطاقة الأحفورية

ناقشنا في الفصل الخامس منشأ الوقود الأحفوري. الطاقة الأحفورية هي الطاقة التي نحصل عليها من احتراق الوقود الأحفوري. وهدفنا هنا هو استعراض تاريخ الوقود الأحفوري[1] قبل مناقشة بعض أنواع الوقود الأحفوري الهامة جداً: الفحم الحجري، والنفط، والغاز الطبيعي. ونختتم هذا الفصل بمقدمة عن الوقود الأحفوري غير التقليدي.

1.6 تاريخ الوقود الأحفوري

لقد استُخدِم الوقود الأحفوري من قِبَل الحضارات لآلاف السنين. وكان الفحم الحجري أول وقود أحفوري يُستخدم على نطاق واسع. يصف نيف (Nef) [1977] بريطانيا القرن السادس عشر كأول اقتصاد رئيسي في العالم اعتمد على الفحم الحجري. وقد اعتمدت بريطانيا على الغابات قبل أن تتحول إلى الفحم الحجري. والانتقال في الفترة بين حوالي عامي 1550 و1700 بعد الميلاد استلزم استهلاك وإزالة غابات بريطانيا نهائياً. كان الفحم الحجري بديلاً للخشب وكان الوقود المفضّل خلال الثورة الصناعية. وكان يُستخدم لغلي الماء

وإنتاج البخار للتوربينات والمحركات البخارية. كما كان يُستخدم في وسائل النقل لتوفير وقود الاحتراق للمحركات البخارية على القطارات والسفن. وظهور محرك الاحتراق الداخلي قد أتاح استبدال الفحم الحجري بالنفط كوقود لوسائل النقل. ويُستخدم الفحم الحجري اليوم لتوفير الوقود للعديد من محطات الكهرباء العاملة بإحراق الفحم الحجري.

ولقد استخدم الناس النفط منذ الحضارات الأولى في الشرق الأوسط، مثل مصر وبلاد ما بين النهرين، حوالي عام 3000 إلى 2000 قبل الميلاد. خلال تلك الفترة، جُمع النفط بكميات قليلة من التسريبات السطحية. كان يُستخدم في إنشاء المباني، وصناعة القوارب المضادة للماء والتشييدات الأخرى ، وترصيع المجوهرات، والتحنيط. وبدأ العرب باستخدام النفط لصناعة الأسلحة الحارقة في أوائل عام 600 بعد الميلاد. وبحلول القرن الثامن عشر، كان الفحم الحجري قد استُخدِم في أوروبا لإنارة شوارع مودينا بإيطاليا، ومساعدة صانعي الشموع في إسكوتلندا بتجارتهم [شيفرد وشيفرد (Shepherd and Shepherd)، 1998].

اعتبر دانيال يرجين (Daniel Yergin) [1992، ص 20] الأميركي جورج بيسيل (George Bissell) بأنه الشخص صاحب الفضل الأكبر في خلق صناعة النفط الحديثة. أدرك بيسيل في عام 1854 بأن الزيت الصخري يمكن استخدامه للإنارة، فجمع مجموعة من المستثمرين معاً في منتصف عام 1850 ـ كان النفط يُسمّى بالزيت الصخري في القرن التاسع عشر للتمييز بينه وبين الزيت النباتي والزيت الحيواني. شكّلت المجموعة «شركة بنسلفانيا للزيت الصخري لمدينة كونيكتيكت» (Pennsylvania Rock Oil Company of Connecticut) واختارت جيمس تاونسيند (James M. Townsend) ليكون رئيسها.

لاحظ بيسيل وتاونسيند بأن النفط كان في بعض الأحيان ينتج مع الماء من آبار المياه. واعتقدا بأن الزيت الصخري يمكن استخراجه من باطن الأرض بالحفر بنفس الطريقة التي كان يتم بها حفر آبار المياه. قام تاونسيند بتكليف إدوين دريك (Edwin L. Drake) لحفر بئر في منطقة أويل كريك بالقرب من مدينة تيتوسفيل بولاية بنسلفانيا. وهذا الموقع كان به الكثير من التسريبات النفطية. بدأ المشروع في عام 1857 وواجه العديد من المشاكل. في الوقت الذي بلغ فيه درايك للنفط يوم 27 آب/ أغسطس 1857، كانت هناك رسالة من تاونسيند في طريقها إلى دريك تخبره فيها بأن الاعتمادات المالية ستتوقف [فان دايك (van Dyke)، 1997].

تسببت بئر درايك في ارتفاع قيمة النفط بشكل حاد. تم التمكن من تكرير النفط للاستخدام في الإنارة والطبخ. واستبدال الزيت الصخري بزيت الحوت، الذي كان يُربّى نادراً وباهظ الثمن، قلّل الحاجة إلى صيد الحيتان للوقود لإشعال المصابيح. وفي غضون خمسة عشر شهراً من بلوغ درايك للنفط، كانت ولاية بنسلفانيا تنتج 450,000 برميل في السنة من 75 بئراً. وبحلول عام 1862، كان يتم إنتاج ثلاثة ملايين برميل وهبط سعر النفط إلى عشرة سنتات للبرميل الواحد [كراوشار ورستاينن (Kraushaar and Ristinen)، 1993].

أسّس رجل الصناعة جون روكفيلر (John D. Rockefeller) شركة ستاندرد أويل (Standard Oil) في عام 1870؛ وبحلول عام 1900 احتفظت الشركة بالاحتكار الفعلي على إنتاج النفط في الولايات المتحدة. وهذا أدى إلى إصدار قانون من الكونغرس، وهو قانون شيرمان ضد الاحتكار، وذلك لكسر احتكار روكفيلر لصناعة النفط، إلا أن صدوره لم يكن قبل أن يصنع النفط من روكفيلر رجلاً مشهوراً وغنياً.

في عام 1882، أدّى اختراع المصباح الكهربائي إلى انخفاض الطلب على الكيروسين. هذا الانخفاض في الطلب على الزيت الصخري لم يدم طويلاً على كل حال. فالتوسع السريع في صناعة السيارات احتاج إلى النفط للوقود والتزييت.

وفّرت حقول النفط في ولاية بنسلفانيا كمية قليلة من النفط نسبياً لم تكف لتلبية الطلب. تم اكتشاف مصادر جديدة للنفط في مطلع القرن العشرين. فقد عثِر على النفط في ولايتي أوهايو وإنديانا، ولاحقاً في وادي سان فرانسيسكو بولاية كاليفورنيا، وبالقرب من مدينة بيمونت بولاية تكساس. وبحلول عام 1909، أنتجت الولايات المتحدة النفط أكثر من بقية الدول الأخرى مجتمعة، حيث كانت تنتج نصف مليون برميل في اليوم. وإلى عام 1950، أنتجت الولايات المتحدة أكثر من نصف إمداد العالم للنفط. اكتشافات المخازن الكبيرة للنفط في وسط وجنوب أميركا وفي الشرق الأوسط أدت إلى قيام الولايات المتحدة بخفض الإنتاج. وكان أعلى إنتاج للنفط في الولايات المتحدة في عام 1970 منذ أن كان منخفضاً. إلا أن التزايد في الطلب على النفط استمر في الولايات المتحدة وفي أماكن أخرى من العالم. فمنذ عام 1948، استوردت الولايات المتحدة النفط أكثر من تصديره. واليوم، تستورد الولايات المتحدة تقريباً نصف ما تحتاج إليه من النفط.

حتى عام 1973، كانت أسعار النفط متأثرة بطلب السوق والعرض للنفط الذي كان يقدّم بشكل أكبر من قِبَل مجموعة من شركات النفط المعروفة باسم «سيفن سيسترز» (Seven Sisters). هذه المجموعة تضمنت إكسون (Exxon)، ورويال دتش/ شل (Royal Dutch/Shell)، وبريتيش بيترولیوم (British Petroleum BP)، وتكساكو (Texaco)، وموبيل (Mobil)، وستاندرد أويل أوف

كاليفورنيا (التي أصبحت شيفرون (Chevron))، وغولف أويل (Gulf Oil). في عام 1960، تبنّت المملكة العربية السعودية تشكيل «منظمة الدول المصدرة للبترول» المعروفة باسم «أوبك» (OPEC). وفي عام 1973، أصبحت أوبك لاعباً رئيسياً في تجارة النفط من خلال زيادة أسعار النفط المصدَّر من قِبَل أعضائها. هذه الزيادة في الأسعار أصبحت تعرف باسم «أزمة النفط الأولى » بسبب ارتفاع الأسعار بالنسبة إلى المستهلكين في العديد من الدول.

واليوم، ما زال الوقود الأحفوري هو الوقود الأساسي لتوليد الطاقة الكهربائية، إلا أن المجتمع أصبح قلقاً وبشكل متزايد إزاء الاعتماد العالمي على موارد محدودة، وأيضاً على التأثر البيئي الناجم عن احتراق الوقود الأحفوري. وتبيّن قياسات درجة حرارة الجو المحيط ارتفاعاً في متوسط درجة حرارة الغلاف الجوي للأرض. هذا الارتفاع في درجة الحرارة يُسمّى الاحتباس الحراري العالمي، ويرجع جزء كبير منه إلى انبعاث نواتج احتراق الوقود الأحفوري إلى الغلاف الجوي. سنناقش الاحتباس الحراري بتفصيل أكثر في القسم 3.7.

2.6 الفحم الحجري

يتكوّن الفحم الحجري من النفايات العضوية بواسطة عملية تعرف باسم التحول الفحمي[2] (Coalification). عندما يتم تسخين بعض أنواع المواد العضوية وضغطها لفترة من الزمن، فإنها يمكن أن تكوّن مواد متطايرة (الماء والغاز) ومادة متبقية (الفحم الحجري). وفي بعض الأحيان، يتكوّن أيضاً زيت شمعي ذو وزن جزيئي عالٍ. على سبيل المثال، يمكن دفن نباتات المستنقع تحت ظروف لاهوائية فتصبح الخث (Peat). والخث هو راسب طبيعي غير متماسك من

مادة نباتية متفحمة جزئياً في بيئة مشبعة مائياً، مثل المستنقع. وإذا تم تغطية الخث بصخرة وأُخضِع لدرجة حرارة وضغط متزايدين فإنه يمكن أن يشكّل الفحم الحجري.

تشمل الكائنات الحية التي تكوّن الفحم الحجري عند خضوعها لعملية التحول الفحمي الطحالب، والعوالق النباتية والحيوانية، والتحلل البكتيري للنباتات، وإلى حد ما، الحيوانات. تتكوّن النفايات العضوية أساساً من الكربون، والهيدروجين، والأكسجين؛ ويمكن أيضاً أن تحوي مقادير قليلة من عناصر أخرى مثل النيتروجين والكبريت. ونشأة المادة العضوية للفحم الحجري تقدّم تفسيراً للعناصر المكوّنة للفحم الحجري، والتي تمتد من $C_xH_yO_z...S...$ إلى الكربون، حيث تدل النقاط على عناصر أخرى.

تُستخدم المادة العضوية لخلق مكوّنات الفحم الحجري المجهرية «النواقع» (Macerals)، التي تعتبر من لبنات البناء الأساسية للكيروجين (Kerogen). والكيروجين هو أحد المكوّنات الهامة للفحم الحجري. والكيروجين مادة عضوية منتشرة في الرواسب وغير قابلة للذوبان في المحلول النفطي مثل ثنائي كبريتيد الكربون. وهناك ثلاثة أنواع من النواقع: الفيتراينايت (Vitrinite)، والليبتاينايت (Liptinite)، والإنترتاينايت (Intertinite). الفيتراينايت يتم اشتقاقه من الأنسجة الخشبية. والليبتاينايت يتم اشتقاقه من الجزء الراتنجي الشمعي للنباتات. والإنترتاينايت يتم اشتقاقه من النباتات المتحللة أو المحروقة. ويمكن التمييز بين أنواع النواقع من خلال بريقها. الفيتراينايت له بريق بني خافت؛ والليبتاينايت يبرق تحت الضوء فوق البنفسجي؛ والإنترتاينايت ليس له بريق.

والفحم الحجري مصنّف بحسب الرتبة. والرتبة هي مقياس لدرجة التحوّل الفحمي، أو النضوج، في السلسلة التي تمتد من

الليجنيت (لونه بنّي داكن أو رمادي) إلى الغرافيت. أقل رتبة للفحم هي الليجنيت (Lignite)، يليها في الترتيب الفحم القاري الفرعي (Sub-Bituminous)، ثم الفحم القاري (Bituminous)، ثم الفحم الصلب (Anthracite)، ثم الغرافيت (Graphite). ورتبة الفحم الحجري لها علاقة بنضوج، أو عمر، الفحم الحجري. فكلما نضج الفحم الحجري، تقل نسبة ذرات الهيدروجين إلى الكربون ونسبة ذرات الأكسجين إلى الكربون. وأعلى رتبة للفحم، وهي الغرافيت، تصل إلى 100 في المئة كربون. ويصبح الفحم الحجري أكثر سواداً وكثافة مع زيادة الرتبة.

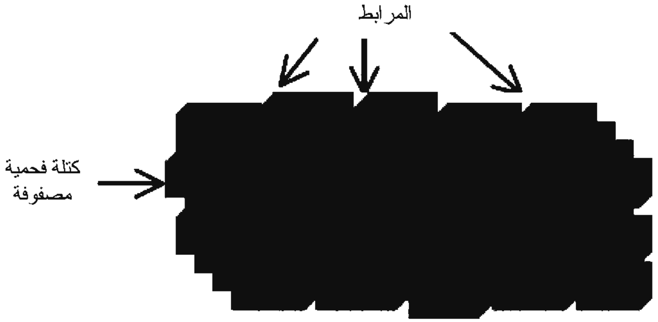
يحترق الفحم الحجري بشكل أفضل إذا كان غنياً نسبياً بالهيدروجين؛ وهذا يشمل الفحم ذا الرتبة الأقل والنسبة الأعلى للهيدروجين إلى الكربون. والنسبة المئوية لتطاير المواد في الفحم الحجري تنخفض كلما نضج الفحم الحجري. هذه المواد المتطايرة تشمل الماء، وثاني أكسيد الكربون، والميثان. وغاز الفحم (Coal Gas) هو الغاز الممتص في الفحم الحجري، وهو عادة الميثان مع كميات أقل من ثاني أكسيد الكربون. وكمية الغاز التي يمكن أن تُمتص في الفحم الحجري تزداد لأن التركيب الجزيئي للفحم ذي الرتبة الأعلى لديه سعة أكبر على امتصاص الغاز وبالتالي الإمكانية لاحتواء غاز أكثر. أيزوثرم لانغمير (Langmuir Isotherm) (أو خط تساوي درجة حرارة لانغمير) يقدّم مقياساً للمحتوى الغازي G_C في الفحم الحجري؛ ويكتب على الصورة التالية:

$$G_C = V_L \frac{P}{P_L + P} \qquad (6.2.1)$$

حيث P ضغط المسام، وV_L حجم لانغمير، وP_L ضغط لانغمير. ويُعبّر عن المحتوى الغازي عادة بحجم المكعب المعياري

للغاز لكل كتلة من الفحم الحجري، مثل الأمتار المكعبة المعيارية للغاز لكل طن من الفحم الحجري.

إن الفحم الحجري هو صخر رسوبي من مادة عضوية. يبيّن الشكل (1.6) التركيب الفيزيائي لعرق الفحم (Coal Seam). وعرق الفحم هو الطبقة الفحمية (Coalbed) التي تحوي الفحم الحجري، وهي عبارة عن مجموعة من الكتل الفحمية المصفوفة (Coal Matrix) المحددة بصدوع (Fractures) طبيعية. وتحتوي الشبكة الصدعية في الطبقات الفحمية على صدوع مجهرية تسمى مرابط (Cleats). تسمح شبكة المرابط المتصلة مع بعضها لغاز الفحم بالتدفق من الكتل الفحمية المصفوفة عندما ينخفض الضغط في الصدع. وتعتبر هذه الآلية هامة لإنتاج ميثان الطبقة الفحمية.



الشكل (1.6): رسم توضيحي لعرق فحم حجري نموذجي

تعتبر الطبقات الفحمية مصدراً وفيراً للميثان. ويوجد ميثان الطبقة الفحمية كطبقة أحادية الجُزَيء على السطح الداخلي من المصفوفة الفحمية. وتكوين الطبقة الفحمية هي الميثان بشكل سائد، إلا أنها يمكن أن تحتوي أيضاً على مكوّنات أخرى ، مثل الإيثان، وثاني أكسيد الكربون، والنيتروجين، والأكسجين. التفريغ الغازي

الإضافي للغاز من الفحم الحجري معروف تماماً لدى عمال مناجم الفحم الحجري بأنه خطر آمن، ويحدث عندما ينخفض الضغط تدريجياً في نظام المرابط. بعد هذا التفريغ، يعتبر الميثان الموجود في التركيب المسامي المجهري للطبقة الفحمية مصدراً للغاز الطبيعي. ويمكن لغاز الفحم الحجري أن ينتشر في الشبكة الصدعية الطبيعية عندما يوجد تدرّج في الضغط بين المصفوفة والشبكة الصدعية.

يعتمد استخراج الغاز من الطبقات الفحمية على ثلاث عمليات. يبدأ استخراج الغاز بانتزاز (Desorption) الغاز من السطح الداخلي إلى المصفوفة الفحمية والمسامات المجهرية. ينتشر الغاز بعد ذلك خلال المصفوفة الفحمية والمسامات المجهرية إلى المرابط. وأخيراً، يتدفق الغاز خلال المرابط إلى بئر الإنتاج. ويعتمد معدّل التدفق، جزئياً، على تدرج الضغط في المرابط والكثافة وتوزيع المرابط. والآليات التي تتحكم في إنتاج الغاز من الطبقات الفحمية هي معدّل الانتزاز من سطح الفحم الحجري إلى المصفوفة الفحمية، ومعدّل الانتشار من المصفوفة الفحمية إلى المرابط، ومعدّل تدفق الغاز خلال المرابط.

استخراج ونقل الفحم الحجري

يتم إنتاج الفحم الحجري عادة باستخراجه من الطبقات الفحمية. والتعدين (أو استخراج الفحم الحجري من المناجم) هي طريقة الاستخراج الأكثر شيوعاً. وهناك أنواع مختلفة من التقنيات لتعدين الفحم الحجري. بعض من التقنيات الهامة جداً لتعدين الفحم الحجري تتضمن التعدين السطحي (Strip Mining)، والتعدين الجانبي (Drift Mining)، والتعدين الجوفي (Deep Mining)، وتعدين الحائط الطويل (Long-Wall Mining). التعدين السطحي هو

استخراج الفحم الحجري الموجود عند سطح الأرض عن طريق الكشط. أما المناجم الجانبية فتُستخدم لاستخراج الفحم الحجري من عروق الفحم المكشوفة نتيجة ميلان الجبل. والمناجم الجانبية عادة لها مدخل لنفق أفقي إلى عرق الفحم. والتعدين الجانبي هو استخراج الفحم الحجري من باطن الأرض. وفي التعدين الجانبي، يتم استخراج الفحم الحجري بتعدين عرق الفحم وترك الطبقات المحيطة زائدة الحمولة وناقصة الحمولة غير مبعثرة. وإحدى التقنيات الشائعة للتعدين الجوفي هي تعدين الحُجرة ـ والعمود (Room-and-Pillar).

في تقنية تعدين الحُجرة ـ والعمود تُشق قنوات في عرق الفحم. ويجب دعم سقوف هذه القنوات وإلا فإنها ستنهار. ولهذا يتم ترك أعمدة من الفحم الحجري في مكان الشق لتعمل كدعامات لسقوف القنوات. كما يمكن استخدام أعمدة خشبية لتوفير دعم إضافي لمنع الانهيارات. ويتم شق عدة قنوات متوازية في العرق العريض نسبياً لتحسين عملية استخراج الفحم الحجري من العرق. هذه القنوات يتم ربطها بقنوات عرضية متقاطعة معها. ويجب حفر أعمدة للهواء وللتهوية وذلك للسماح لغاز الفحم الحجري، وهو عادة الميثان، بالخروج من الغرف التي تكوّنت نتيجة الاستخراج. وإذا كان عرق الفحم عميقاً جداً بالنسبة إلى تعدين الحجرة ـ والعمود، يمكن في هذه الحالة استخدام تقنية تسمى تعدين الحائط الطويل. في تعدين الحائط الطويل، تقوم آلة القطع بكسر الفحم الحجري من ألواح الفحم في أثناء حركتها إلى الأمام وإلى الخلف عبر السطح المكشوف من الفحم الحجري. وتُستخدم ناقلة لجلب الفحم الحجري المتكسر إلى السطح.

ويتم نقل الفحم الحجري إلى المستهلكين بوسائل نقل أرضية، وخصوصاً بالقطارات، وبدرجة أقل، بالسفن. وهناك وسيلة غير

مكلفة نسبياً لنقل الفحم الحجري وهي خطوط الأنابيب المصنوعة من الطين الفحمي. والطين الفحمي هو خليط من الماء والفحم المسحوق ناعماً. وخطوط الأنابيب المصنوعة من الطين الفحمي لا تُستخدم على نطاق واسع لأنه من الصعب في أغلب الأحيان الحصول على أحقّية الطريق لخطوط الأنابيب المصنوعة من الطين الفحمي التي تمتد عبر مسافات طويلة، لا سيما في المناطق التي تشترك فيها خطوط الأنابيب المصنوعة من الطين الفحمي مع أحقية الطريق الموجودة للسكك الحديدية.

3.6 الموائع البترولية

إن أنواع الجُزَيئات التي تشكِّل المائع هي التي تحدد تركيب المائع[3]. وحالة المائع يمكن أن تكون إما غازية أو سائلة. يحتوي المائع النقي على نوع واحد من الجُزَيئات ، مثل الماء أو الميثان. أما إذا احتوى المائع على عدة أنواع من الجُزَيئات ، فإنه يُسمّى خليط المائع. البترول هو خليط من جُزَيئات الهيدركربون. والماء في الموقع الأصلي، أو الماء الموجود في الصخرة المكمنية، يحتوي عادة على مواد صلبة مذابة في صورة متأينة وقد يحتوي على غازات مذابة. وتركيب المائع يمكن تحديده على شكل قائمة من المكونات الجزيئية المحتواة في المائع مع مقاديرها النسبية.

يُعرَّف المقدار النسبي لكل مكوِّن في الخليط بتركيز المكوِّن. ويمكن التعبير عن التركيز بكسر، مثل الحجم الكسري، أو الوزن الكسري، أو الجُزَيء الغرامي الكسري. الحجم الكسري هو حجم المكوِّن مقسوماً على الحجم الكلي للمائع؛ والوزن الكسري هو وزن المكوِّن مقسوما على الوزن الكلي للمائع؛ والجُزَيء الغرامي الكسري (المول الكسري) (Mole Fraction) هو عدد الجُزَيئات الغرامية

(المولات) (Moles) للمكوِّن مقسوماً على عدد المولات الكلية للمائع. ووحدة التركيز يجب التعبير عنها بوضوح لتفادي الأخطاء. وتُستخدم الرموز $\{x_i, y_i, z_i\}$ لتدل على المول الكسري للمكوِّن i في طور السيولة، والطور الغازي، والدفق البئري (Wellstream) على التوالي. والدفق البئري هو خليط المائع الذي يمر خلال حفرة البئر التي تصل بين المكمن والمنشآت السطحية.

يلخص الجدول (1.6) المحتوى الكتلي للموائع البترولية لمعظم العناصر الشائعة. والبترول هو في أغلبه هيدروكربون، وهذا متوقع إذا افترضنا منشأه بحسب نظريتي النشوء الحيوي والنشوء التلقائي اللتين ناقشناهما في الفصل الخامس. وتعتمد العناصر الفعلية المكوّنة للمائع البترولي على عوامل مثل مكونات مصادره، ودرجة حرارة المكمن، وضغط المكمن.

الجدول (1.6) العناصر المكوّنة للموائع البترولية

العنصر	التركيب (بحسب الكتلة ٪)
الكربون	87 ـ 84
الهيدروجين	14 ـ 11
الكبريت	0.68 ـ 0.6
النيتروجين	1.7 ـ 0.02
الأكسجين	1.8 ـ 0.08
معادن	0.14 ـ 0.00

إن جُزَيئات الهيدروكربون في الموائع البترولية هي جُزَيئات عضوية. ونتوقع بأن تكون الجُزَيئات في الموائع البترولية غير متفاعلة ومستقرة لأنها موجودة في خليط المائع لملايين السنين. أما إذا كانت متفاعلة أو غير مستقرة، فإنها ستكون قد تفاعلت أو تفككت في فترة

ما من الزمن ونواتجها ستكون موجودة في المائع البترولي.

إن البرافينات، والنفثينات، والمركبات العطرية (الأروماتية) هي بعض الجُزَيئات الأكثر شيوعاً في الموائع البترولية. وهذه الجُزَيئات مستقرة نسبياً عند درجات الحرارة والضغط النموذجيين للمكمن. جُزَيئات البرافين تتمثل بالصياغة الكيميائية العامة C_nH_{2n+2} وهي هيدروكربونات مشبعة. والهيدروكربون المشبع لديه رابطة تساهمية واحدة بين كل من ذرات كربوناته. ومن الأمثلة على جُزَيئات البرافين تتضمن الميثان (CH_4) والإيثان (C_2H_6). وجُزَيئات النفثين لديها الصياغة الكيميائية العامة C_nH_{2n}. وجُزَيئات النفثين هيدروكربونات مشبعة بتركيب حلقي. وأحد الأمثلة على جزيء النفثين هو السيكلوبنتان (C_5H_{10}). والتركيب الحلقي تجعلها تحتفظ برابطة واحدة بين ذرات الكربون مع ذرتين هيدروجين أقل من تلك الموجودة في جُزَيئات البرافين. وكل ذرّة الكربون مرتبطة بذرتي كربون أخريتين وذرتي هيدروجين. وللجُزَيئات الأروماتية حلقة كربون واحدة أو أكثر وهي جُزَيئات غير مشبعة ـ أي إن لها عدة روابط بين بعض ذرات الكربون. والبنزين هو أحد الأمثلة على الجُزَيء الأروماتي. ووجود رابطتين أو أكثر بين ذرتين كربون يمكن أن تجعل الجُزَيء العضوي متفاعلاً وغير مستقر. والجُزَيئات الأروماتية لديها تركيب حلقي تجعلها نسبياً مستقرة وغير متفاعلة.

نوع المائع

إن فاصل نسبة الغاز إلى النفط (Separator Gas-Oil Ratio (GOR)) مؤشّر مفيد لنوع المائع. ونسبة الغاز إلى النفط هي النسبة بين حجم الغاز إلى حجم النفط عند نفس درجة الحرارة والضغط. وحجم الخليط البترولي يعتمد على التغيّرات في التركيب وأيضاً

التغيّرات في درجة الحرارة والضغط. وفاصل نسبة الغاز إلى النفط هو نسبة الغاز إلى النفط عند درجة حرارة وضغط الفاصل. والفاصل هو عبارة عن حاوٍ يسمح لخليط المائع بأن ينفصل إلى أطوار المائع المختلفة. وتشير الوحدة SCF/STB في الجدول (2.6) إلى قدم مكعب معياري (Standard Cubic Foot) واحد من الغاز مقسوماً على صهريج تخزين برميل (Stock Tank Barrel) واحد من النفط. والحجم المعياري هو الحجم عند ظروف درجة الحرارة والضغط المعياريتين. وحجم صهريج التخزين هو الحجم عند درجة حرارة وضغط صهريج التخزين، وهو الحاوي المستخدم لتخزين النفط المنتج. العمود الثالث في الجدول (2.6) يصف ما يحدث للمائع عند انخفاض الضغط في المكمن في أثناء الإنتاج. هذا الانخفاض في الضغط يُسمّى استنفاد الضغط (pressure depletion).

الجدول (2.6) القواعد العامة لتصنيف أنواع المائع

نوع المائع	فاصل نسبة الغاز إلى النفط (SCF/STB)	سلوك استنفاد الضغط في المكمن
غاز جاف	لا توجد سوائل سطحية	يبقى غازاً
غاز رطب	أكبر من 100,000	يبقى غازاً
تكثيف	100,000 - 3,000	غاز مع تقاطر سائل
نفط متطاير	3,000 - 1,500	سائل مع غاز كثير
نفط أسود	1,500 - 100	سائل مع بعض الغاز
نفط ثقيل	0	تكوّن غاز مهمل

يتم تمييز النفط غالباً بدلالة ثقل- API (API Gravity). أي إن ثقل-API هو مقياس لثقل النفط، ويتم حسابه من الثقل النوعي للنفط γ_o عند درجة الحرارة والضغط المعياريتين من خلال المعادلة التالية (API هنا تدل على «معهد البترول الأميركي» الذي وضع هذا المقياس):

$$API = \frac{141.5}{\gamma_o} - 131.5 \qquad (6.3.1)$$

إن الثقل النوعي (specific gravity) هو النسبة بين كثافة المائع إلى الكثافة المرجعية. ويتم حساب الثقل النوعي عند الظروف المعيارية باستخدام كثافة ماء عذب ككثافة مرجعية.

والنفط الثقيل لا يحتوي على الكثير من الغاز في المحلول وله وزن جزيئي وثقل نوعي γ_o كبيران نسبياً. وعلى العكس من ذلك، فإن النفط الخفيف يحتوي على كمية كبيرة من الغاز في المحلول وله وزن جزيئي وثقل نوعي γ_o صغيران نسبياً. ومعادلة الثقل (API Gravity) تبيّن أن النفط الثقيل له ثقل API أكبر من النفط الخفيف لأن النفط الثقيل له ثقل نوعي γ_o أكبر من النفط الخفيف.

ويتم حساب الثقل النوعي للغاز عند الظروف المعيارية باستخدام كثافة الهواء ككثافة مرجعية من خلال المعادلة التالية:

$$\gamma_g = \frac{M_a(\text{غاز})}{M_a(\text{هواء})} \approx \frac{M_a(\text{غاز})}{29} \qquad (6.3.2)$$

حيث M_a الوزن الجزيئي الظاهري. ويتم حساب الوزن الجزيئي الظاهري من المعادلة التالية:

$$M_a = \sum_{i=1}^{N_c} y_i M_i \qquad (6.3.3)$$

حيث N_c عدد المكوّنات، وy_i المول الكسري للمكوّن i، وM_i الوزن الجزيئي للمكوّن i.

حجم المائع

إن حجم أيّ طور من أطوار المائع يمكن أن يكون له اعتماد حساس على التغيّرات في الضغط ودرجة الحرارة. على سبيل

المثال، عامل التكوين الحجمي للغاز يتم حسابه غالباً بدقة معقولة باستخدام معادلة الغاز الحقيقي $PV=Z_nRT$، حيث n عدد مولات الغاز في الحجم V عند الضغط P ودرجة الحرارة T. ويكون الغاز مثالياً إذا كان معامل انضغاطية الغاز $z=1$؛ ويكون حقيقياً إذا كانت $z=1$. والكمية التي تمثل التغير في الحجم لأيّ طور من أطوار المائع هي عامل التكوين الحجمي. وعامل التكوين الحجمي (Formation Volume Factor) هو النسبة بين الحجم المشغول بواسطة أيّ طور من أطوار المائع عند الظروف المكمنية إلى الحجم المشغول بواسطة ذلك الطور للمائع عند الظروف السطحية. والظروف السطحية هي عادة صهريج التخزين أو الظروف المعيارية. وعوامل التكوين الحجمي للنفط والماء تتراوح عادة بين 1 إلى 2 وحدات من حجم المكمن لكل وحدة من الحجم عند الظروف السطحية. ويتفاوت عامل التكوين الحجمي على نحو أوسع لأن حجم الغاز حساس جداً للتغيرات في الضغط من الظروف المكمنية إلى الظروف السطحية. ويبيّن قانون الغاز الحقيق أن حجم الغاز يتناسب عكسياً مع الضغط.

القيمة التسخينية للغاز

يمكن حساب القيمة التسخينية للغاز (Gas Heating Value) من تركيب الغاز والقيمة التسخينية المصاحبة لكل مكوّن للغاز. ويمكن تعريف القيمة التسخينية لخليط الغاز H_m كالتالي:

$$H_m = \sum_{i=1}^{N_c} y_i H_i \qquad (6.3.4)$$

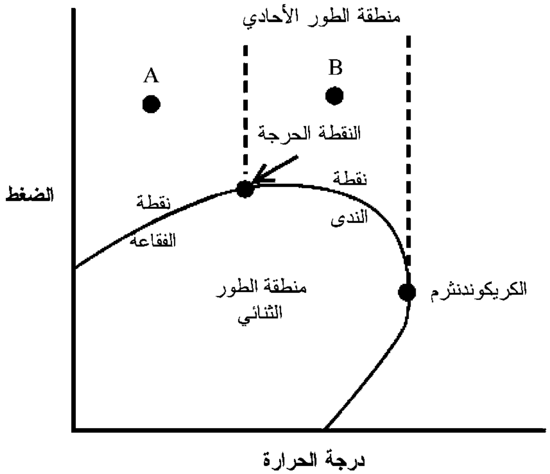
حيث N_c عدد المكوّنات، وy_i المول الكسري للمكوّن i، وH_i القيمة التسخينية للمكوّن i. والقيمة التسخينية للغاز الطبيعي

النموذجي تتفاوت بين $1000\ BTU/SCF\ (3.72\times10^{7}\ J/m^{3})$ إلى 1200 BTU/SCF $(4.47x10^{7}\ J/m^{3})$. والقيم التسخينية للمكوّنات الجزيئية في الخليط مجدولة في الكتب المرجعية.

سلوك أطوار المائع

إن سلوك أيّ طور من أطوار المائع يتم عادة تعريفه كدالة في المتغيّرات الثلاثة: الضغط (P)، والحجم (V)، ودرجة الحرارة (T). ويتم غالباً تبسيط الرسم البياني PVT الناتج للموائع البترولية بإعداد مسقط للضغط ـ درجة الحرارة (P-T) للرسم البياني PVT. يبيّن الشكل (2.6) مثالاً لرسم بياني للضغط–درجة الحرارة (P-T).

والرسم البياني P-T في الشكل (2.6) يتضمن كلاً من منطقتي الطور الأحادي والثانوي. المنحنى الذي يفصل الطور الأحادي عن الطور الثانوي يُسمّى غلاف الطور (Phase Envelope). والضغوط المصاحبة لغلاف الطور تسمى ضغوط التشبّع (Saturation Pressures). والمائع البترولي عند درجة الحرارة الأقل من درجة حرارة النقطة الحرجة T_c والضغوط الأعلى من ضغط التشبّع يوجد كسائل أحادي الطور. وضغوط التشبّع عند درجات الحرارة الأقل من T_c تسمّى ضغوط نقطة الفقاعة (Bubble Point Pressures). وإذا هبط الضغط إلى أقل من ضغط نقطة الفقاعة، فإن السائل الأحادي الطور يُسمّى النفط الأسود (النقطة A في الشكل (2.6)). وإذا افترضنا ضغوطاً في منطقة الطور الأحادي وتحركنا إلي اليمين في الرسم البياني جاعلين درجة الحرارة تزداد نحو النقطة الحرجة، فإننا سنقابل النفط الطيار.



الشكل (2.6): الرسم البياني للضغط ـ درجة الحرارة [فانشي (Fanchi)، 2001].

يعتمد سلوك المائع البترولي عند درجات الحرارة الأعلى من النقطة الحرجة على موقع الكريكوندنثرم (Cricondentherm). والكريكوندنثرم هي درجة الحرارة القصوى التي يمكن أن يوجد فيها المائع في كل من الطور الغازي وطور السيولة معاً. وموائع المكمن تسمى تكثيفات (Condensates) إذا كانت درجة الحرارة أقل من الكريكوندنثرم وأعلى من درجة حرارة النقطة الحرجة T_c (النقطة B في الشكل (2.6)). والتكثيف هو غاز عند الظروف المكمنية، إلا أنه يحتوي على جُزَيئات ذات وزن جزيئي عال تكفي لتكوين طور السيولة عندما يهبط الضغط في المكمن إلى أقل من ضغط التشبّع. وضغط التشبّع للتكثيف يُسمّى ضغط نقطة الندى (Dew Point Pressure). ونلقى المكامن الغازية عندما تكون درجة حرارة المكمن أكبر من الكريكوندنثرم.

يمكن توقّع التغيرات في سلوك الطور نتيجة التغيرات في الضغط باستخدام الرسم البياني P-T. لنفترض أن المكمن يحتوي

على هيدروكربونات عند الضغط ودرجة الحرارة الموافقين لمنطقة النفط الأسود أحادي الطور. إذا كان ضغط المكمن ينخفض بدرجة حرارة ثابتة، فإن ضغط المكمن سيعبر في النهاية منحنى ضغط نقطة الفقاعة ويدخل إلى منطقة الطور الثنائي الغاز ـ النفط. وسيتكوّن طور غازي حر في منطقة الطور الثنائي. وبالمثل، إذا بدأنا بالطور الأحادي للتكثيف الغازي وسمحنا لضغط المكمن أن ينخفض بدرجة حرارة ثابتة، فإن ضغط المكمن سيعبر في النهاية منحنى ضغط نقطة الندى ليدخل إلى منطقة الطور الثنائي. وفي هذه الحالة، سيتقاطر طور سائل حر من التكثيف الغازي. وبمجرد أن يتقاطر السائل، فإن من الصعب العودة إلى الوضع السابق. وإذا انخفض الضغط أكثر، فإن بعضاً من خليط الهيدروكربون سيخضع لتكاثف تراجعي، أي إن التكثيف يمكن أن يدخل مرة أخرى إلى الطور الغازي.

يمكن تطبيق الرسم البياني P-T أيضاً على تغيرات درجة الحرارة والضغط في حفر البئر. ينتقل مائع المكمن من درجة حرارة وضغط عاليين نسبياً عند الظروف المكمنية إلى درجة حرارة وضغط منخفضين نسبياً عند الظروف السطحية. ونتيجة لذلك، يكون من المعتاد أن نرى موائع المكمن أحادية الطور تصبح موائع ثنائية الطور في الوقت الذي تصل فيه إلى السطح. وإذا كان التحوّل من الطور الأحادي إلى الطور الثنائي يحدث سريعاً في حفرة البئر، وهو الأمر الشائع، عندئذ يقال إن المائع قد مر بتحول ومضي من الطور الأحادي إلى الثنائي.

4.6 استكشاف البترول

إن الإلمام بالنظريات المتعلقة بتشكّل الأرض وبمفاهيم جيولوجيا البترول هي متطلبات هامة للكشف عن المكامن الحاوية للهيدروكربون. ناقشنا في الفصل الرابع تشكّل الأرض. تركيزنا هنا

سيكون على جيولوجيا وجيوفيزياء البترول، وهما العِلمان الأساسيان لاستكشاف البترول.

التكوين والسحنة

تسمّى البيئة التي يتكوّن تحتها الصخر بيئة الترسيب. وإذا كانت البيئة الترسيبية تتحرك من موقع إلى آخر خلال الأزمنة الجيولوجية، فإنها تترك جانبياً سلسلة متصلة من الصخور المتميزة في خصائصها. على سبيل المثال، الشاطئ المتحرّك قد يترك طبقة من الحجر الرملي من الكوارتز. وهذه الصخور المتسلسلة يمكن أن تمتد إلى مئات الأميال. وإذا كانت السلسلة كبيرة بما فيه الكفاية لتخطيطها، فإنه يمكن تسميتها تكويناً.

والتكوينات (Formations) هي الوحدات الوصفية الأساسية لسلسلة من الرواسب. ويمثل التكوين وحدة صخرية تم ترسيبها وفقاً لمجموعة متماثلة من الظروف في وقت واحد. والوحدة الصخرية يجب أن تكون سهلة التمييز كوحدة كما يجب أن تكون ممكنة لتخطيطها، والتي تدل ضمناً على درجة الاستمرارية ضمن الوحدة الصخرية. والتكوين يجب أن يمثل مجموعة من الظروف الترسيبية السائدة على الرغم من أن الصخور في التكوين الواحد قد تحتوي على أكثر من نوع من الصخور وتمثل أكثر من نوع من البيئة الترسيبية. وإذا كانت الأنواع المختلفة من الصخور ضمن التكوين يمكن تخطيطها، فإنه يشار إليها كأعضاء.

إن سماكة التكوينات قد يكون بضعة أقدام أو مئات الأقدام. وسماكة التكوين له علاقة بطول الزمن الذي كانت فيه البيئة في موقع معيّن، وأيضاً مقدار الترسّب الذي حدث خلال تلك الفترة.

كل سلسلة صخرية على حدة تحدد خصائص كل بيئة ترسيبية.

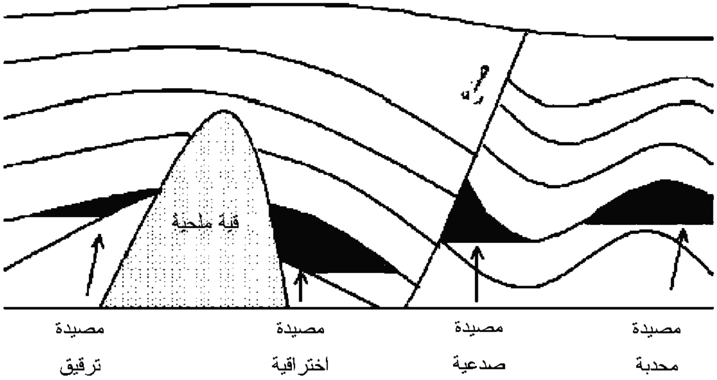
والبيئة النهرية يمكن أن ترسّب الحجر الرملي. وبيئة الدلتا يمكن أيضاً أن ترسب الحجر الرملي. ولكن الحجر الرملي المترسّب في كل من البيئتين له خصائص مختلفة تماماً. على سبيل المثال، النظام النهري يمكنه ترسيب صخور تتبع مساراً متعرجاً من موقع إلى آخر، بينما ترسيب الدلتا يميل إلى أن يكون ثابتاً في المكان ويرسّب رواسب عند فوهة الدلتا. وفي النظام النهري، الأحجار الرملية لها خصائص معينة. وحجم حبة الرمل المترسّبة بواسطة النظام النهري تصبح أنعم في الأعماق الأكثر ضحالة في عملية تسمّى التنعيم المتنامي (Fining Upwards). أضف إلى ذلك، أن هناك ترسيباً أخشن عند قاعدة التكوين التي تميّز النظام النهري عن ترسيب الدلتا.

تسمّى الخصائص الصخرية التي يمكن أن تُستخدم لتحديد بيئتها الترسيبية سِحنة (Facies). في مثال بيئة الترسيب النهرية، خصائص الحجر الرملي التي تدل على بيئته الترسيبية يمكن أيضاً تعريفها كسِحنة. ويتم تمييز السحنة بخصائص يمكن مشاهدتها في الواقع. إذا شوهد حجر رملي محصي بشكل مستقل عن الصخور المحيطة، فإنه يمكن تصنيفه بسهولة إلى البيئة النهرية. وبإضافة معلومة بأنه محاط بطين بحري عميق، فإن الباحث الجيولوجي يمكن أن يعدّل التفسير ليكون بيئة ترسيبية عكرة تكون فيها الرواسب عالقة في التيار المتدفق سريعاً. والبيئة الترسيبية العكرة مترافقة مع تيارات عكرة ذات طاقة عالية. ودمج جميع المعلومات المتوفرة سيؤدّي إلى تحديد أفضل لخصائص الصخور.

التراكيب والمصائد

يمكن للهيدروكربونات أن تنزح على طول المسارات المنفّذة. والموائع البترولية عادة أقل كثافة من الماء وستنزح نحو السطح في

عملية تسمى الفصل بالجاذبية (Gravity segregation). هذا النزوح يتم إيقافه عندما تواجه الموائع حاجزاً يمنع التدفق. هذه الحواجز المانعة للتدفق تسمى مصائد، ويبيّن الشكل (3.6) بعض المصائد البترولية. تتجمع الموائع البترولية في هذه المصائد. والمصائد هي الأماكن التي يتم فيها إيقاف تحرك المائع. وهناك نوعان أساسيان من المصائد: مصائد تركيبية (Structural)، ومصائد طبقاتية (Stratigraphic). تظهر المصائد التركيبية في الأماكن التي طويت وربما تصدعت فيها الطبقات المكمنية إلى أشكال يمكن أن تحوي موائع قيّمة تجارياً مثل النفط والغاز. الطيات المحدبة (Anticlines) هي النوع الشائع من المصائد التركيبية.



الشكل (3.6): المصائد البترولية

إن المصائد الطبقية هي النوع الأساسي الآخر من المصائد. وتظهر المصائد الطبقية في الأماكن التي تتم فيها إعاقة مسار تدفق المائع من خلال تغيرات في خصائص التكوين. هذه التغيرات في خصائص التكوين يجب أن تخلق حاجزاً ضد تدفق المائع الذي يمنع نزوح الهيدروكربون. وأنواع المصائد الطبقية تشمل تنعيم الرمل، أو

تخفيض المسامية نتيجة للتغيرات التحويرية (Diagenetic). والتحوير (Diagenesis) يشير إلى العمليات التي تتغير فيها الخصائص الصخرية للتكوين عند درجات الحرارة والضغوط المنخفضة نسبيّاً عند مقارنتها بتكوّن الصخور المتحولة. والتحوير يشمل عمليات مثل التراص (Compaction)، والسمنتة (Cementation)، والدلمتة (Dolomitization). والدلمتة هي عملية استبدال ذرّة الكالسيوم في كربونات الكالسيوم بذرّة ماغنيسيوم لتكوين الدولوميت (كربونات الكالسيوم والماغنيسيوم البلورية). والدولوميت الناتج أصغر من كربونات الكالسيوم الأصلية ويؤدي إلى تشكّل مسامية ثانوية في مكامن الكربونات.

بالإضافة إلى المصيدتين التركيبية والطبقية، هناك العديد من الأمثلة على المصائد المتكونة بواسطة مجموعة السمات التركيبية والطبقية. ومثل هذه المصائد تسمى المصائد المركّبة (Combination Traps). وهناك مصيدة أخرى منتشرة في خليج المكسيك وهي المصيدة الاختراقية (Diapiric Trap). والمصيدة الاختراقية المبيّنة في الشكل (3.6) تكوّنت عندما تحرك ملح ذو كثافة صغيرة نسبياً نحو الأعلى وحل محل رواسب ذات كثافة عالية.

عوامل المكمن

للصخرة الموجودة في المكمن البترولي خاصيتان هامتان لكي تكون مكمناً مُجدياً اقتصادياً: المسامية والنفاذية. تعرّفنا على المسامية والنفاذية في الفصل الرابع. والمسامية هي النسبة بين حجم الفراغ الشاغر إلى الحجم الكلي للصخرة زائداً فراغ المسام. والمسامية هي العامل الذي يحدد سعة الوسط المسامي لخزن المائع. والنفاذية هي مقياس للاتصال البيني للفراغات المسامية ولها

وحدات مساحة مقطع؛ وهي تمثل سعة التدفق للصخرة. والصخور الرسوبية عادة منفّذة، أما الصخور النارية والتحولية فهي عادة غير منفّذة. ويمكن إيجاد البترول أحياناً في تصدعات الصخور النارية المتصدعة. أما إذا كانت الصخور النارية غير متصدعة، فإنها لا تمتلك عادة اتصالاً بينياً للفراغات المسامية تكفي لتكوين مسار لتدفق البترول إلى حفرة البئر. وهذا ينطبق أيضاً على الصخور المتحولة.

يمكن إيجاد الموائع البترولية عادة في الفراغات المسامية للصخور الرسوبية. أما الصخور النارية والمتحولة فتخلق ظروفاً من الضغط ودرجة الحرارة العاليين اللذين لا يدعمان تكوّن أو إبقاء الموائع البترولية. وأيّ مائع بترولي يكون قد شغل مسامات صخرة متحولة يتم طرده عادة بالحرارة والضغط.

يجب أن يتوفر عدد من العوامل الهامة التي تسمح بنشوء مكمن هيدروكربوني:

1 - يجب وجود مصدر للهيدروكربون. على سبيل المثال، يُعتقد بأن أحد مصادر النفط والغاز هو انحلال الكائن الحي المائي أحادي الخلية. وصخور الطفَل المتكوّنة بتسخين وضغط الطمي والطفَل هي غالباً صخور مصدرية جيدة. والنفط والغاز يمكن أن يتكوّنا عندما تكون بقايا الكائن الحي خاضعة لضغط ودرجة حرارة متزايدين.

2 - يجب وجود مسار للتدفق بين الصخرة المصدرية والصخرة المكمنية.

3 - بمجرد نزوح المائع الهيدروكربوني إلى صخرة مكمنية ملائمة، تصبح آلية الاصطياد هامة. فإذا لم يتم إيقاف المائع

الهيدروكربوني من النزوح، ستتسبب قوة الطفو والقوى الأخرى بتحركه نحو السطح.

4 - إن اجتياز جميع هذه العوامل مبنيّ على التوقيت. يمكن للصخر المصدري أن يوفر كميات كبيرة من النفط أو الغاز للمكمن، إلا أنه يجب وجود مصيدة في نفس الوقت الذي يدخل فيه النفط أو الغاز إلى المكمن.

جيوفيزياء الاستكشاف والتطوير

تاريخياً، استُخدمت التقنيات الجيوفيزيائية لتطوير صورة عن البنية الكبرى الموجودة في باطن الأرض وذلك قبل البدء بالحفر. ويتم الحصول على صورة عن باطن الأرض، بما في ذلك البنية التركيبية للمكمن، بتوليد اضطراب ينتشر خلال القشرة الأرضية. ينعكس هذا الاضطراب عند حدود الأسطح الفاصلة في باطن الأرض؛ ومن ثم يتم استقبال الإشارات المنعكسة ومعالجتها وتفسيرها. والاضطراب المستخدم بشكل شائع في الاستكشاف الجيوفيزيائي هو الموجة الزلزالية.

الموجات الزلزالية (السيزمية) هي اهتزازات، أو إزاحات متذبذبة من موضع غير مضطرب، تنتشر من المصدر، مثل انفجار أو مهتز ميكانيكي، خلال الأرض. وتُستخدم مصادر طاقة، مثل الديناميت أو المعدات المسقطة للأوزان، لتوليد اهتزازات في الأرض. الطاقة المنطلقة بواسطة هذا الاضطراب تنتشر مبتعدة عن مصدر الاضطراب كموجات زلزالية. والنوعان الشائعان من الاهتزازات، أو الموجات الزلزالية، هما موجات-P الانضغاطية (Compressional) وموجات-S القصية (Shear). موجات-P هي موجات طولية أما موجات-S فهي موجات مستعرضة. الموجات الطولية هي الموجات التي تزاح فيها

جُسَيمات الوسط المضطرب في اتجاه موازٍ لاتجاه انتشار الموجة. أما الموجات المستعرضة فهي الموجات التي تزاح فيها جُسَيمات الوسط المضطرب في اتجاه عمودي على اتجاه انتشار الموجة. وموجات-S تنتقل بسرعة أقل من موجات -P كما أن موجات -S لا تنتشر خلال الموائع. والموجات الانضغاطية أو موجات -P تسمى أحياناً بالموجات الابتدائية أو موجات الضغط، أما الموجات القصية أو موجات-S فتسمّى أحياناً بالموجات الثانوية.

والموجات الزلزالية هي اهتزازات تنتشر خلال الأرض من مصدر ميكانيكي. وعندما تقابل الموجة الزلزالية سطحاً عاكساً، فإن جزءاً منها ينفذ وجزءاً منها ينعكس. ويحدث الانعكاس الزلزالي عند السطح الفاصلة بين منطقتين مختلفتين في المعاوقة الصوتية. وتُعرَّف المعاوقة الصوتية Z بحاصل ضرب الكثافة الحجمية ρ_B وسرعة الانضغاطية V_P. أي إن:

$$Z = \rho_B V_P \tag{6.4.1}$$

وتسمى المعاوقة الصوتية Z أيضاً بالمعاوقة الانضغاطية لاعتمادها على السرعة الانضغاطية. ويمكن أيضاً إجراء تعريف مماثل باستخدام السرعة القصية لتعريف المعاوقة القصية كالتالي:

$$Z_S = \rho_B V_S \tag{6.4.2}$$

حيث V_S السرعة القصية. ويُعطى معامل الانعكاس RC عند الخط الفاصل بين طبقتين لهما معاوقة صوتية Z_1 وZ_2 بالعلاقة التالية:

$$\mathrm{RC} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \tag{6.4.3}$$

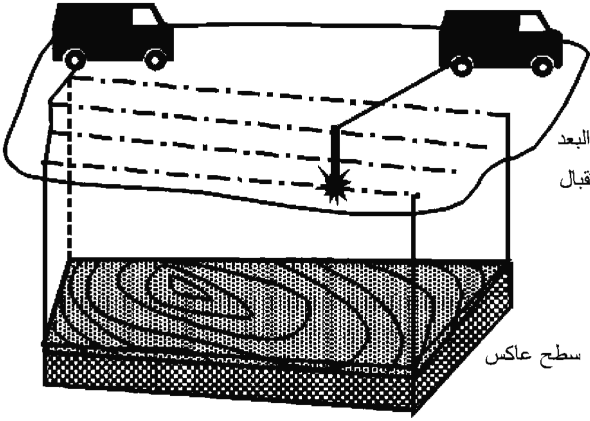
وتعرض الصور الزلزالية التباينات في الخصائص الصوتية لأن

معامل الانعكاس يعتمد على الفرق بين المعاوقتين الصوتيتين في الطبقتين المتجاورتين. إذا كان التغير في المعاوقة الصوتية كبير بما فيه الكفاية، فإن الموجة المنعكسة يمكن الكشف عنها عند السطح.

إن القدرة على التمييز بين خاصيتين متقاربتين جداً هو أساس التحليل. وهذا يصبح هاماً في القياسات الزلزالية المصممة للحصول على صورة لسطحين منعكسين. يمكن توجيه السطحين العاكسين عمودياً، أو أفقياً، أو بزاوية معينة بينهما. ويمكن أن يكونا ضمن بضعة أمتار عن بعضهما أو تفصلهما مسافات كبيرة جداً. هذان السطحان العاكسان يمكن أن يمثّلا تغيرات في السحنة، أو تماسّات المائع، أو أيّ تغير في المعاوقة الصوتية التي يمكن أن تكون متعلقة بخصائص المكمن. جودة التحليل الزلزالي سيحدد مدى فائدة عمليات المسح الزلزالي (السيزمي).

تستخدم أجهزة الاستقبال المسماة مقاييس الزلازل (Seismometers) للكشف عن الموجات الزلزالية. والسمّاعة الأرضية «الجيوفون» (Geophone) هي مقياس الزلازل المستخدم على اليابسة، والسماعة المائية «الهيدروفون» (Hydrophone) هي مقياس الزلازل المستخدم في البيئة البحرية. وأجهزة الاستقبال السطحية، أو أجهزة الاستقبال في حفر الآبار، أو أجهزة الاستقبال في قيعان البحار تُستخدم للكشف عن الاهتزازات المتولدة بواسطة المصادر المتحكمة. يوضح الشكل (4.6) مسح زلزالي (سيزمي) ثلاثي البعد باستخدام ترتيب ثنائي البعد لأجهزة استقبال على اليابسة. إن الزمن المستغرق من المصدر إلى المستقبل يمثّل المعلومات الأولية المسجلة بواسطة أجهزة الاستقبال خلال مرحلة الحصول على بيانات المسح الزلزالي. والخارج من المستقبل يتم إرساله إلى محطة التسجيل حيث يتم تسجيل الإشارات بواسطة راسم الزلازل (Seismograph). إن الرسم

البياني الذي يمثل حركة المستقبِل الواحد يُسمّى رسم (Trace) مقياس الزلازل. والعارض للنتائج يُسمّى صفحة راسم الزلازل (Seismogram) أو رصد الزلازل (Seismic Section). والمعلومات الأخرى مثل سعة وتوهين الإشارة يمكن أيضاً الحصول عليها واستخدامها في الخطوة التالية: معالجة البيانات.



الشكل (4.6): المسح الزلزالي (السيزمي)

تُستخدم معالجة البيانات لتحويل صورة الزمن المستغرق إلى صور أعماق. وهذا يتطلب تحويل القياسات الزمنية إلى أعماق، والتي تعتمد بالتالي على سرعة انتشار الإشارة الصوتية خلال الأرض. والعلاقة بين الزمن المستغرق والعمق تتطلب إعداد نموذج للسرعة. يحدد نموذج السرعة اعتماد سرعة الموجة الزلزالية على العمق. ويعتمد توزيع السرعة على الوصف الطبقي لجيولوجية باطن الأرض. وبمجرد تحويل الصورة الزلزالية من الزمن إلى التمثيل العمقي، يتم الاستعداد للخطوة الثالثة في عملية المسح الزلزالي: التفسير.

إن البنية تحت السطحية التي تم الحصول عليها من القياسات

الزلزالية هي جزء من المعلومات المتعلقة بالمشاهدة والتي تُستخدم لتطوير نموذج جيولوجي. وهذا النموذج الجيولوجي هو تفسير للصورة الزلزالية كدالة في العمق. ويتم الاحتياج إلى كمبيوترات للتعامل مع الحجم الكبير من المعلومات التي تم الحصول عليها من المسوحات الزلزالية الحديثة، والتصوير الكمبيوتري هو الطريقة الفعالة جداً لرؤية البيانات. ويتم تحقيق الخصائص المثلى للمكمن من خلال دمج المعلومات الزلزالية مع جميع المعلومات الأخرى المتوفرة، مثل جيولوجيا المنطقة وبيانات البئر.

تُستخدم التقنيات الجيوفيزيائية اليوم في الاستكشاف والتطوير. وتُجرى مسوحات التطوير الجيوفيزيائية في الحقول التي تتخلل فيها الآبار الطبقة المطلوبة (Target Horizon) (أي الطبقة الصخرية المستهدفة للمسح الجيوفيزيائي). وكمية البيانات السيزمية هي بحجم أو أكبر من جيوفيزياء الاستكشاف، كما إن من الممكن ربط الخطوط السيزمية إلى بيانات البئر، مثل سجلات البئر. والنتيجة هي مجموعة من البيانات السيزمية التي تمت معايرتها مع «البيانات الرئيسية» (Hard Data) من الطبقة المطلوبة. ووجود بيانات التحكم بالبئر تتيح عملية استخلاص المزيد من المعلومات التفصيلية من البيانات السيزمية. ويتم الحصول على بيانات البئر من قياسات إنتاج المائع أو أحجام الحقن، والعيّنات الأسطوانية، وسجلات البئر. ويتم الحصول على سجلات البئر بتشغيل جهاز يُسمّى عدة (Tool) في حفرة البئر. وتستطيع العدة الكشف عن الخصائص الفيزيائية مثل درجة الحرارة، أو التيار الكهربائي، أو النشاط الإشعاعي، أو الانعكاسات الصوتية.

5.6 إنتاج البترول

تبدأ المراحل في عمر المكمن عندما يتم حفر بئر الكشف

الأول. قبل بئر الكشف، يعتبر المكمن هدفاً استكشافياً. وبعد بئر الكشف، يكون المكمن مصدراً، ربما اقتصادياً أو ربما غير اقتصادي. ويبدأ عمر إنتاج المكمن عندما يتم سحب المائع من المكمن. ويتم تأسيس حدود المكمن بواسطة مسوحات زلزالية وبئر التحديد (Delineation Well). وآبار التحديد هي الآبار التي يتم حفرها أساساً لتحديد حجم المكمن، كما يمكن أيضاً استخدامها للإنتاج أو الحقن في ما بعد خلال عمر المكمن. ويمكن أن يبدأ الإنتاج مباشرة بعد حفر بئر الكشف، أو بعد سنوات من حفر عدد من آبار التحديد. عدد الآبار المستخدمة لتطوير الحقل، وموقع الآبار، وخصائص تدفقها هي من بين العديد من الأمور التي يجب أخذها في الاعتبار من قِبَل إدارة المكمن.

تاريخ طرق الحفر[4]

لقد تم تطبيق أول طريقة حفر للنفط في العصر الحديث بواسطة إدوين درايك في الخمسينيات من القرن التاسع عشر وتعرف بالحفر بالدق (Cable-Tool Drilling). وفي هذه الطريقة، يتم ربط حبل إلى عارضة خشبية موصل في طرفها لقمة حفر (Drill Bit). يتم رفع وخفض العارضة، فترتفع وتسقط معه لقمة الحفر، التي تقوم بدورها بحفر الأرض عند سقوطها. ويمكن لطريقة الحفر بالدق أن تعمل سريعاً، إلا أن الحفار يجب أن يقوم بشكل دوري بسحب اللقمة خارج الحفرة وتنظيف الحفرة. وهذه الطريقة لا تعمل في تكوينات الصخر الناعم حيث يمكن لجوانب الحفر أن تنهار. وعلى الرغم من أن طريقة الحفر بالدق لا تزال نادرة الاستخدام لحفر الآبار الضحلة وعمليات الصيانة، إلا أنه قد تم استبدالها بطريقة الحفر الدوراني.

وطريقة الحفر الدوراني تم تطويرها في فرنسا في الستينيات من

القرن التاسع عشر، واستخدمت لأول مرة في الولايات المتحدة في الثمانينيات من القرن التاسع عشر، لأنها استطاعت الحفر في تكوينات الصخر الناعم في حقل نفط كورسيكانا بولاية تكساس. وتستخدم طريقة الحفر الدوراني لقمة حفر دوارة بفوهات من أجل تفريغ الطين الناتج عن الحفر للتغلغل في الأرض. الطين الناتج عن الحفر مركب من الطفَل والماء يدفع فتات الصخر خارج اللقمة ويحملها إلى أعلى البئر نحو السطح.

اكتسب الحفر الدوراني شهرة كبيرة بعد قيام الكابتن أنتوني لوكاس (Anthony F. Lucas) بحفر البئر «لوكاس 1» في حقل نفط سبيندلتوب (Spindletop) بالقرب من مدينة بيمونت بولاية تكساس. وُلد لوكاس على شاطئ مدينة دالماشيان التابعة للإمبراطورية النمساوية ـ المجرية وخدم في البحرية النمساوية قبل هجرته إلى الولايات المتحدة. كان البئر «لوكاس 1» بئراً كشفياً وغزير التدفق. وقد تدفق الغاز والنفط خارج البئر وغمر برج الحفر. وبدلاً من التدفق بالمعدّل المتوقع 50 برميل من النفط في اليوم، كان البئر ينتج نحو 75,000 برميل في اليوم. وقاد البئر لوكاس المتدفق إلى ازدهار نفط تكساس [يرجين 1992، ص 83-85]. ومنذ ذلك الوقت، أصبحت طريقة الحفر الدوراني الوسيلة الأساسية للحفر.

بمجرد أن يتم حفر الحفرة من الضروري استكمال البئر. وتكتمل البئر عندما يتم إعدادها للإنتاج. وأول بئر مكتملة في العصر الحديث تم استكمالها في عام 1808 عندما استخدم أخوان أميركيان، دايفد وجوزيف رفنر (David and Joseph Ruffner)، تبطيناً خشبياً لمنع الماء المالح ذي التركيز المنخفض من تخفيف الماء المالح ذي التركيز العالي الذي كانا يستخلصانه من الأعماق في بئر الماء المالح التابعة لهما [فان دايك (Van Dyke)، 1997، ص 145-146].

لاستخلاص النفط من الآبار، من الضروري أحياناً توفير طاقة باستخدام أنواع مختلفة من المضخات أو حقن غاز لزيادة الطفو لخليط النفط والغاز. المضخات الأولى كانت تستخدم العوارض الخشبية نفسها التي استُخدمت في طريقة الحفر بالدق. وقامت شركات النفط بتطوير قدرة ضخ مركزية في الثمانينيات من القرن التاسع عشر. واستخدمت قدرة الضخ المركزية محركاً أساسياً، وهو مصدر القدرة، لضخ عدد من الآبار. وفي العشرينيات من القرن العشرين، أدّت المطالبة باستبدال أجهزة الحفر على الموقع إلى استخدام نظام ضخ ذي عارضة لضخ الآبار. ونظام الضخ ذو العارضة عبارة عن وحدة قائمة بذاتها يتم تركيبها عند سطح كل بئر وتقوم بتشغيل مضخة في الحفرة. والتقنيات الحديثة أيضاً تتضمن مضخة الرفع بالغاز والمضخة الغاطسة.

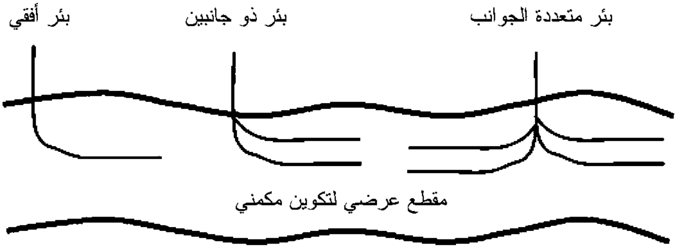
طرق الحفر الحديثة

يؤدي التقدم في تكنولوجيا الحفر إلى توسيع الخيارات المتاحة لإدارة المكامن الجوفية بحكمة وإنتاج الوقود الأحفوري، وبصفة خاصة النفط والغاز. وسنقوم في الفقرات التالية بتقديم أربعة مجالات لتقنية الحفر: الحفر بالتعبئة (Infill Drilling)، وحفر الآبار الأفقية (Horizontal Wells)، وحفر الآبار متعدّدة الجوانب (Multilateral Well)، والحفر الموجَّه (Geosteering).

إن الحفر بالتعبئة هو عملية زيادة عدد الآبار في المنطقة بحفر آبار في الفراغات بين الآبار الموجودة. والزيادة في الكثافة البئرية، أو عدد الآبار لكل وحدة مساحة، يمكن أن تحسّن من كفاءة الاستخراج عن طريق توفير نقاط استخراج للمائع في أجزاء من المكمن لم تكن قد أَنتجت. والتغييرات على أنماط البئر والزيادة في الكثافة البئرية

يمكن أن يغيّرا من أنماط الاكتساح في عمليات الإزاحة ويتيحا إزاحة الموائع التي في مواقعها الأصلية بواسطة موائع محقونة. ويعتبر الحفر بالتعبئة مفيداً بشكل خاص في المكامن غير المتجانسة.

والبئر هو عبارة عن سلسلة من الأنابيب المتصلة المتحدة مركزياً. المسار المتبع بواسطة هذه السلسلة من الأنابيب يُسمّى مسار البئر. تاريخياً، تم حفر آبار عمودياً في الأرض وكان مسار البئر بشكل أساسي خطّاً عمودياً مستقيماً. واليوم، يتم حفر الآبار بحيث يكون مسار البئر متقوّسا. ويعتبر هذا الحفر ممكناً لأن طول كل من الأنابيب المستقيمة التي تشكل البئر صغير مقارنة بالطول الإجمالي للبئر. طول كل مقطع نموذجي من الأنبوب في البئر هو 40 قدماً (12.2 m). وطول البئر الواحد من سطح الأرض يمكن أن يكون في حدود 10 km. هذه الآبار الطويلة تسمى الآبار الممتدة (Extended Reach Wells).



الشكل (5.6): آبار متعددة الجوانب

ويمكن أيضاً حفر الآبار بحيث يكون مسار البئر أفقياً. ويوضح الشكل (5.6) البئر الأفقية. عندما تصل البئر عمقاً معيّناً يُسمّى نقطة البداية (Kick-Off Point)، تُستخدم أسافين ميكانيكية أو غيرها من الأدوات لحرف لقمة الحفر والبدء بتقويس مسار البئر. والقسم الأفقي

من البئر يُسمّى اللسان المنبسط (Reach). ويمكن أيضاً حفر آبار بأكثر من حفرة. والبئر التي تحتوي على أكثر من حفرة تسمى بئراً متعددة الجوانب (والحفر الكثيرة تسمى فروعاً). ويبيّن الشكل (5.6) أمثلة مختلفة على مسارات البئر الحديثة المتعددة الجوانب. والقسم العمودي من البئر يُسمّى الحفرة الرئيسية (الأم) أو الخرطوم. والنقطة التي تلتقي عندها الحفرة الرئيسية والجانب تسمى الوصل (Junction). على سبيل المثال، البئر ذات الجانبين هي بئر بفرعين. تكنولوجيا البئر متعددة الجوانب تحدث ثورة في تقنية الاستخراج وإدارة المكامن.

تتيح الآبار متعددة الجوانب ربط المسارات المتعددة للبئر إلى حفرة بئر مشتركة. والآبار متعددة الجوانب لها تطبيقات عديدة. على سبيل المثال، تُستخدم الآبار متعددة الجوانب في البيئات البحرية التي تكون فيها فتحات البئر محدودة بمقدار الفراغ المتوفر على المنصّة. كما تُستخدم لإنتاج المائع من المكامن التي تمتلك حجيرات عديدة. والحجيرة (Compartment) في المكمن هي حيّز معزول عن باقي أجزاء المكمن بواسطة حواجز لتدفق المائع. هذه الحواجز يمكنها سد الصدوع كلياً أو جزئياً، أو سد تكوينات الترقيق.

إن حُفَر الآبار الأفقية، والممتدة، والمتعددة الجوانب التي تتبع التكوينات الجوفية توفّر إمكانية الوصول إلى أجزاء كثيرة من المكمن من مواقع أقل للبئر. وهذا يوفّر وسيلة للتقليل من الأثر البيئي المصاحب للحفر والمنشآت الإنتاجية، سواء على اليابسة أو عند البحر. وتتيح الآبار الممتدة استخراج البترول من أسفل المناطق الحساسة بيئياً أو تجارياً عن طريق الحفر من مواقع خارج المناطق الحساسة بيئياً أو تجارياً.

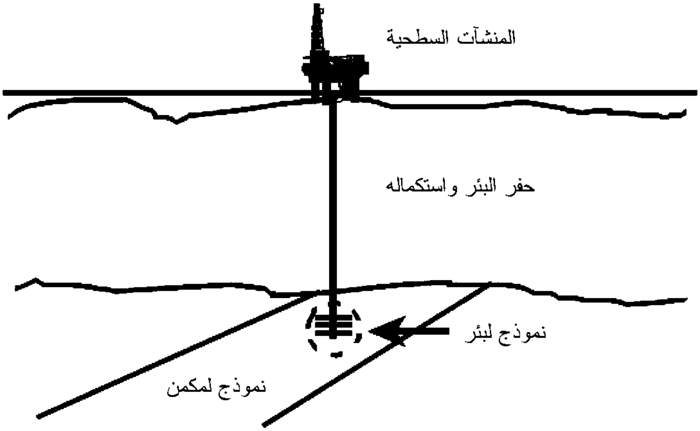
والحفر الموجّه عبارة عن تقنية تتيح عملية توجيه البئر بدقة إلى

موقعه المستهدف وهو متطلب أساسي للحفر الممتد الناجح. وتُستخدم أدوات إلكترونية دقيقة في أدوات الحفر لتوفير المعلومات لعمال أجهزة الحفر عند سطح الأرض عن موقع لقمة الحفر في أثناء قيامها بحفر الحفرة في الأرض. ويمكن للعمال تعديل مسار البئر في أثناء حفرها وذلك استناداً إلى المعلومات التي يتم الحصول عليها من هذه الأنظمة للقياس ـ في أثناء ـ الحفر. وقد قامت مشاريع الحفر الممتد بحفر آبار لمواقع تبعد عن أجهزة الحفر بمسافة أفقية تصل إلى حدود 10 km. على سبيل المثال، استخدمت شركة بريتيش بيتروليوم (BP) الحفر الممتد في حقل ويتش فارم (Wytch Farm) على الساحل الجنوبي من إنجلترا[5]. ويمكن للحفر الموجّه والحفر الممتد أن يخفضا من التكاليف المصاحبة لإنشاء منصات بحرية جديدة غالية من خلال توسيع حجم المكمن الذي يمكن الوصول إليه مباشرة من موقع الحفر المحدد. وفي بعض الحالات، يمكن استخدام الآبار المحفورة من أجهزة حفر في المنطقة اليابسة لإنتاج حقول ساحلية في عرض البحر تكون ضمن نطاق الحفر الممتد.

أنظمة الإنتاج

إن نظام الإنتاج عبارة عن مجموعة من الأنظمة الفرعية، كما هو موضّح في الشكل (6.6). يتم أخذ الموائع من المكمن باستخدام الآبار؛ ويجب حفر الآبار واستكمالها. ويعتمد أداء البئر على خصائص الصخرة المكمنية، والتفاعل بين الصخرة والموائع في المكمن، وخصائص الموائع في المكمن. وتشتمل موائع المكمن على موائع موجودة بالأصل في المكمن وأيضاً على موائع ربما تم إدخالها كجزء من عملية إدارة المكمن التي سنناقشها في القسم التالي. كما يعتمد أداء البئر أيضاً على خصائص البئر نفسها، مثل مقطعها العرضي، وطولها، ومسارها، واستكمالها. وتؤسس عملية

استكمال البئر الربط بين البئر والمكمن. واستكمال البئر يمكن أن يكون ببساطة استكمال حفرة مفتوحة، والتي يتم منها السماح للموائع بالتسرب إلى حفرة البئر من صخرة مكمنية موحدة، إلى استكمالات تتطلب استخدام شبكة أنابيب مثقوبة خلال جدرانها باستخدام جهاز يحدث صفاً من الثقوب وذلك للسماح للمائع بالتدفق بين شبكة الأنابيب والمكمن.



الشكل (6.6): نظام الإنتاج

يتم الاحتياج إلى المنشآت السطحية لحفر، واستكمال، وتشغيل الآبار. ويمكن نقل أجهزة الحفر من موقع إلى آخر على الشاحنات، أو السفن، أو المنصّات البحرية؛ أو يمكن تركيب أجهزة الحفر بشكل دائم عند مواقع معينة. وقد تقع هذه المنشآت في مناخ صحراوي في الشرق الأوسط، وفي بيئات عواصف بحرية في بحر الشمال، وفي مناخ القطب الشمالي في ألاسكا وسيبيريا، وفي بيئات المياه العميقة في خليج المكسيك وفي سواحل غرب أفريقيا.

والموائع المنتَجة يجب استخراجها، ومعالجتها، ونقلها إلى

المخازن، وفي نهاية المطاف إلى المستهلك. وعملية المعالجة يمكن أن تبدأ عند موقع البئر حيث يتم فصل الدفق البئري المُنتج إلى أطوار النفط، والماء، والغاز. وهناك معالجة إضافية في المصافي تفصل فيها مائع الهيدروكربون إلى منتجات صالحة للسوق، مثل وقود الغازولين والديزل. وعملية نقل النفط والغاز يمكن أن تتم بوسائل مختلفة، تشمل خطوط الأنابيب، وشاحنات نقل النفط، وناقلات النفط ذات الهيكل المزدوج، والسفن المعدّة لنقل الغاز الطبيعي المسال.

تحليل منحنى الانحدار

في مطلع القرن العشرين، لاحظ محلّلو الإنتاج أن الإنتاج من آبار النفط يمكن توقعه بمطابقة معادلة أسّية إلى معدلات انحدار سابقة [فانشي، 2002، الفصل 13]. كانت المعادلة الأسّية ملائمة تماماً للعديد من المكامن المنتجة في الوقت نفسه. أما بيانات الإنتاج من آبار أخرى فقد كان ممكناً مطابقتها بشكل أفضل باستخدام معادلة انحدار زائدي المقطع (Hyperbolic). وبافتراض أن ضغط التدفق ثابت، فإن المعادلة العامة للعلاقتين التجريبيتين الأسّية وزائدية المقطع المستخدمة في تحليل منحنى الانحدار هي:

$$\frac{dq}{dt} = -aq^{n+1} \qquad (6.5.1)$$

حيث a وn ثابتان يحسبان تجريبياً، وq معدّل التدفق، وt الزمن. وتتراوح قيمة الثابت التجريبي n بين 0 إلى 1. وتبيّن حلول المعادلة (6.5.1) الانحدار المتوقع في معدّل التدفق q مع زيادة زمن الإنتاج t. وقد تم تحديد ثلاثة حلول لمنحنى الانحدار بالاستناد إلى قيمة n [إكونومايدس وآخرون (Economides, et al.)، 1994]. سنأخذ هنا فقط حل الانحدار الأسّي ($n = 0$)، وهو:

$$q = q_i e^{-at} \qquad (6.5.2)$$

حيث q_i معدّل التدفق الابتدائي وa عامل يُحسب من خلال مطابقة المعادلة (6.5.2) إلى بيانات البئر أو الحقل.

ويتم مطابقة منحنيات الانحدار إلى البيانات المشاهدة لإنتاج البئر برسم اللوغاريتم الطبيعي لمعدّل التدفق q مقابل زمن الإنتاج t. ومنحنى الانحدار الشائع هو خط مستقيم على الرسم البياني شبه اللوغاريتمي، لأن اللوغاريتم الطبيعي لحل الانحدار الأسّي:

$$\ln q = \ln q_i - at \qquad (6.5.3)$$

هو على الصورة $y=mx+b$ لمعادلة خط مستقيم ميله m والجزء المقطوع منه b. إن العامل a في المعادلة (6.5.3) هو الميل m للخط المستقيم الذي يتم الحصول عليه من رسم اللوغاريتم الطبيعي لمعدّل التدفق q مقابل زمن الإنتاج t. والجزء المقطوع b هو اللوغاريتم الطبيعي لمعدّل التدفق الابتدائي qi.

6.6 إدارة المكمن

إن إدارة الموارد الجوفية، وبصفة خاصة حقول النفط والغاز، يُسمّى إدارة المكمن. ويمكن تعريف إدارة المكمن بأنها الجزء من الموارد التي يتم الاحتياج إليها لتحسين إنتاج موائع قيّمة تجارياً من المكمن. وخطة إدارة المكمن يجب أن تكون مرنة بما فيه الكفاية لتتلاءم مع التطورات التكنولوجية، والتغيرات في العوامل الاقتصادية، والمعلومات التي يتم الحصول عليها خلال عمر المكمن، والاهتمام بجميع أمور التشغيل المتعلقة، بما في ذلك الأنظمة والقوانين الحكومية. وأحد أهداف إدارة المكمن هي تطوير خطة لتحسين كفاءة الاستخراج.

كفاءة الاستخراج

إن كفاءة الاستخراج (Recovery Efficiency) هي مقياس لكمية الموارد المستخرجة بالنسبة إلى كمية الموارد في الموقع الأصلي؛ ويتم تعريفها بمقارنة حجمي المائع الابتدائي والنهائي في الموقع الأصلي. ويمكن الحصول على تقدير لكفاءة الاستخراج المتوقعة بالأخذ في الاعتبار العوامل التي تساهم في استخراج المائع الجوفي. وهناك عاملان مهمان بشكل خاص هما كفاءة الإزاحة (Displacement Efficiency)، وكفاءة الاكتساح الحجمي (Volumetric Sweep Efficiency).

وكفاءة الإزاحة E_D هي مقياس لكمية المائع المتحرك في النظام. على سبيل المثال، كفاءة الإزاحة للنفط تعتمد على الفرق بين الحجم الابتدائي للنفط والحجم النهائي للنفط. لنفترض مكمناً بحجم مسامي V_p، وتشبع نفطي ابتدائي S_{oi} عند عامل التكوين الحجمي الابتدائي B_{oi}، وتشبع نفطي عند الهجر S_{oa} بعامل التكوين الحجمي B_{oa}. ويمكن تقدير كفاءة الإزاحة من العلاقة التالية:

$$E_D = \frac{\dfrac{V_p S_{oi}}{B_{oi}} - \dfrac{V_p S_{oa}}{B_{oa}}}{\dfrac{V_p S_{oi}}{B_{oi}}} = \frac{\dfrac{S_{oi}}{B_{oi}} - \dfrac{S_{oa}}{B_{oa}}}{\dfrac{S_{oi}}{B_{oi}}} \qquad (6.6.1)$$

بالإضافة إلى كفاءة الإزاحة، فإن كفاءة الاستخراج تعتمد على كمية الهيدروكربون في الموقع الأصلي المتماسة مع الموائع المحقونة. كفاءة الاكتساح المساحي E_A (Areal Sweep Efficiency) وكفاءة الاكتساح العمودي E_V (Vertical Sweep Efficiency) تقيسان درجة التماس بين المائع في الموقع الأصلي والمائع المحقون. وتُعرَّف كفاءة الاكتساح المساحي على النحو التالي:

$$E_A = \frac{\text{المساحة المكتسحة}}{\text{المساحة الكلية}} \quad (6.6.2)$$

كما تُعرّف كفاءة الاكتساح العمودي على النحو التالي:

$$E_V = \frac{\text{صافي السماكة المكتسح}}{\text{صافي السماكة الكلي}} \quad (6.6.3)$$

تعبّر كفاءة الاكتساح الحجمي E_{Vol} عن كفاءة استخراج المائع بدلالة كفاءة الاكتساح المساحي وكفاءة الاكتساح العمودي، أي إن:

$$E_{Vol} = E_A \times E_V \quad (6.6.4)$$

وكفاءة الاستخراج RE هي حاصل ضرب كفاءة الإزاحة وكفاءة الاكتساح المساحي وكفاءة الاكتساح العمودي، أي إن:

$$RE = E_D \times E_{Vol} = E_D \times E_A \times E_V \quad (6.6.5)$$

إن كفاءة الاستخراج هي كسر ما بين 0 إلى 1. فإذا كان واحد أو أكثر من العوامل التي تدخل في حساب كفاءة الاستخراج صغير، فإن كفاءة الاستخراج ستكون صغيرة. ومن ناحية أخرى ، قد تكون هذه العوامل كلها كبيرة نسبيّاً، ومع ذلك ستظل كفاءة الاستخراج صغيرة لأنها عبارة عن حاصل ضرب عوامل أقل من 1. في معظم الحالات، هناك تكنولوجيا متوفرة لتحسين كفاءة الاستخراج، ولكن ربما لا يمكن تنفيذها لأنها غير اقتصادية. وسنناقش بعض من هذه التكنولوجيا في الأقسام التالية. يعتمد تطبيق التكنولوجيا والاستخراج الأقصى للوقود الأحفوري على القيمة الاقتصادية للمورد. ويمكن تطبيق هذا الأمر على جميع مصادر الطاقة.

الإنتاج الابتدائي

لقد تم تقسيم عمر المكمن بشكل تقليدي إلى مجموعة من مراحل الإنتاج. المرحلة الأولى للإنتاج تسمى عادة الإنتاج الابتدائي

(Primary Production). وتعتمد هذه المرحلة كاملة على مصادر الطاقة الطبيعية. ولإزالة البترول من الفراغ المسامي الذي يشغله، يجب أن يحل محله مائع آخر، مثل الماء، أو الغاز الطبيعي، أو الهواء. وإزاحة النفط سببه هو التوسع في الموائع التي في الموقع الأصلي عندما ينخفض الضغط في أثناء الاستنفاد الابتدائي للمكمن. القوى الطبيعية المشتركة في إزاحة النفط خلال مرحلة الإنتاج الابتدائي تسمى دافعات المكمن (Reservoir Drives). وأكثر دافعات المكمن شيوعاً للمكامن النفطية هي الدفع بالماء، والدفع بالمحلول الغازي أو الغاز المذاب، والدفع بالغطاء الغازي.

وأكثر طرق الدفع كفاءة هي الدفع بالماء. وفي هذه الحالة، يقوم الماء بإزاحة النفط مع تدفق النفط إلى آبار الإنتاج. والاستراتيجية الفعالة لإدارة المكمن لمكمن الدفع بالماء هي موازنة عملية سحب النفط مع معدّل تدفق الماء. وتراوح الاستخراج بالدفع بالماء عادة بين 35 في المئة إلى 75 في المئة من النفط في الموقع الأصلي.

وفي الدفع بالمحلول الغازي، فإن الغاز المذاب في الطور الغازي عند درجة حرارة وضغط المكمن ينطلق عندما ينخفض الضغط تدريجياً. ينتقل بعض النفط مع الغاز إلى آبار الإنتاج عندما يتمدد الغاز وينتقل إلى مناطق الضغط المنخفض في المكمن. ويتراوح الاستخراج بالدفع بالمحلول الغازي بين 5 في المئة إلى 30 في المئة من النفط في الموقع الأصلي.

والغطاء الغازي هو عبارة عن مقدار كبير من الغاز عند قمة المكمن. وعند استكمال آبار الإنتاج في منطقة النفط أسفل الغطاء الغازي، فإن الهبوط في الضغط المترافق مع انخفاض الضغط يجعل الغاز ينتقل من الغطاء الغازي ذي الضغط الأعلى متجهاً نحو الأسفل

إلى آبار الإنتاج. هذا الانتقال للغاز يدفع النفط إلى الآبار، وفي النهاية سينتج مقداراً كبيراً من الغاز مع النفط. ويتراوح الاستخراج بالدفع بالغطاء الغازي بين 20 في المئة إلى 40 في المئة من النفط في الموقع الأصلي، على الرغم من أن هناك استخراجاً يصل إلى 60 في المئة يمكن أن تتم في مكامن الغمس الحاد (Steeply Dipping Reservoirs) وبنفاذية كافية تسمح للنفط بالتصريف إلى الآبار التي تنتج من أقل نقطة في التركيب.

إن التصريف بالجاذبية هو الأقل شيوعاً من طرق الإنتاج الابتدائي. في هذه الحالة، يتدفق النفط إلى البئر الذي ينتج من أقل نقطة في المكمن. وسيتدفق النفط إلى بئر الإنتاج إذا كان الفرق في الضغط بين الضغط في المكمن والضغط في بئر الإنتاج يدعم تدفق النفط إلى أسفل التركيب بدلاً من التدفق إلى أعلى التركيب نتيجة الفصل بالجاذبية. والتصريف بالجاذبية يمكن أن يكون فعالاً في مكامن الغمس الحاد الضحلة ذات النفاذية العالية.

في معظم الحالات، تعمل واحدة أو أكثر من طرق الدفع في وقت واحد. ويعتمد سلوك الحقل على أيٍّ من الآليات هي الأهم في مختلف الأوقات خلال عمر الحقل. وأفضل طريقة للتنبؤ بسلوك مثل هذه الحقول هي المقارنة مع النماذج المعقدة لتدفق المكمن. وعلى الرغم من أن المناقشة السابقة تشير إلى مكامن النفط، إلا أنه يمكن تطبيقها أيضاً على مكامن الغاز. إن الدفع بالماء وتمدد الغاز مع استنفاذ ضغط المكمن هما أكثر أنواع الدفع شيوعاً لمكامن الغاز. واستخراج مكمن الغاز يمكن أن تصل إلى ما بين 70 في المئة إلى 90 في المئة من الغاز في الموقع الأصلي بسبب حركية الغاز العالية نسبياً. والحركية (Mobility) λ هي النسبة بين النفاذية الفعالة k_{eff} إلى اللزوجة μ، أي إن:

$$\lambda = \frac{k_{\text{eff}}}{\mu} \qquad (6.6.6)$$

ويمكن تحديد الحركية لأيّ طور من أطوار المائع، وهي عامل تخطيطي هام لإدارة الموارد الجوفية للمائع.

إن مكامن تخزين الغاز لها دورة حياة مختلفة عن مكامن الغاز التي يتم استنفادها. تُستخدم مكامن تخزين الغاز لتخزين الغاز. وإذا استُخدِم الغاز كوقود لمحطات الطاقة الكهربائية، فإنه سيتطلب إنتاجه وإعادة سد النقص منه بشكل دوري. ومميزات الأداء لمكمن تخزين الغاز هي التحقق من مخزون الغاز، وتأمين الطلب المطلوب من الغاز، والنهي عن قطع مسافات بعيدة عن مكمن تخزين الغاز. الطلب المطلوب من الغاز يجب أن يكون كافياً ليتضمن ترجيحات في الطلب يمكن أن تنشأ من عوامل مثل الطلب الموسمي. على سبيل المثال، الطلب على الطاقة يكون في الغالب عالياً في الصيف لتكييف الهواء وفي الشتاء للتدفئة.

الإنتاج الثانوي

لا يكفي الاستنفاد الابتدائي عادة لتحسين الاستخراج من مكمن النفط. واستخراج النفط يمكن مضاعفته مرتين أو ثلاث مرات بإضافة طاقة مكمنية طبيعية. يتم توفير الطاقة الإضافية من خلال مصدر طاقة خارجي، مثل حقن ماء أو حقن غاز. حقن الماء أو الغاز الطبيعي يمكن الإشارة إليهما بأنهما صيانة الضغط أو الإنتاج الثانوي. والاصطلاح الأخير ظهر لأن الحقن عادة أتى بعد فترة من استنفاد الضغط الابتدائي، وهو بذلك كان طريقة الإنتاج الثانية المستخدمة في الحقل. معظم المكامن الحديثة تقوم بدمج صيانة الضغط في مرحلة مبكرة من عمر إنتاج الحقل، وأحياناً من بداية الإنتاج. وفي هذه الحالة، لن يكون المكمن خاضعاً لمرحلة الإنتاج الابتدائية التقليدية.

التصنيفات البديلة

إن كل من عمليتي الاستخراج الابتدائية والثانوية مصممة لإنتاج النفط باستخدام طرق غير قابلة للامتزاج. وعملية الإزاحة غير القابلة للامتزاج (Immiscible Displacement) هي العملية التي يكون فيها فاصل واضح بين المائع المزيح المحقون والمائع المزاح في الموقع الأصلي. ويمكن استخدام طرق أخرى لتحسين كفاءة الاستخراج للنفط وذلك بخفض تشبع النفط المتبقي. وتشبّع النفط المتبقي هو الجزء من النفط الذي يتبقى في الصخرة بعد استخدام المائع المزيح ليفيض على الصخرة. ويتطلب خفض تشبّع النفط المتبقي تغييراً في العوامل التي تتحكم في التفاعل بين المائع والصخرة.

والطرق المصممة لخفض تشبع النفط المتبقي أُشير إليها في المؤلفات العلمية بالإنتاج الثالث (Tertiary Production)، والاستخراج المعزَّز للنفط (Enhanced Oil Recovery)، والاستخراج المحسَّن للنفط (Improved Oil Recovery). مصطلح «الإنتاج الثالث» استُخدم في بادئ الأمر لتحديد المرحلة الثالثة من عمر الإنتاج للحقل. وبشكل عام، المرحلة الثالثة تمت بعد الفَيض المائي. كما اشتملت المرحلة الثالثة من إنتاج النفط على عملية تم تصميمها لتحريك الفَيض المائي على النفط المتبقي. وأحد الأمثلة على عملية الإنتاج الثالث هي عملية الفَيض القابل للامتزاج (Miscible Flood Process)، مثل الفَيض بثاني أكسيد الكربون. وتم تصميم عمليات الإنتاج الثالث لتحسين كفاءة الإزاحة عن طريق حقن الموائع أو الحرارة. كما أشير إليها أيضاً بعمليات الاستخراج المعزَّزة. إلا أنه اكتُشِف بعد ذلك بأن بعض الحقول كان أداؤها أفضل إذا نُفِّذت عمليات الاستخراج المعزَّزة بعد المرحلة الثالثة في عمر إنتاج الحقل. أضف إلى ذلك، وُجِد بأن عمليات الاستخراج المعزَّزة كانت غالباً أغلى من حفر آبار إضافية في النمط الأكثر كثافة.

عملية حفر الآبار من أجل خفض الفراغ بين الآبار وزيادة الكثافة البئرية تسمى الحفر بالتعبئة. وأصل مصطلح «الحفر بالتعبئة» يتزامن مع ميلاد مصطلح آخر هو «الاستخراج المحسَّنة». والاستخراج المحسَّنة تتضمن الاستخراج المعزَّزة للنفط والحفر بالتعبئة. وبعض العمليات الرئيسية للاستخراج المحسَّنة هي الفَيض المائي، والفَيض الغازي، والفَيض الكيميائي، والفَيض الحراري [فان دايك، 1997].

تتضمن تقنية الاستخراج المحسَّنة عمليات استخراج ثانوية تقليدية مثل الفَيض المائي وحقن الغاز غير القابل للامتزاج، وأيضاً عمليات الاستخراج المعزَّزة للنفط[6]. وعمليات الاستخراج المعزَّزة للنفط مصنَّفة عادة بأحد العمليات الآتية: كيميائية، وقابلة للامتزاج، وحرارية، وميكروبية. تستخدم طرق الفَيض الكيميائية مواد كيميائية محقونة مثل سلسلة البوليمرات الطويلة ذات الوزن الجزيئي العالي ومواد سطحية فاعلة شبه منظفة للمساعدة على تحريك وإزاحة النفط. وتتضمن طرق الفَيض القابلة للامتزاج حقن ثاني أكسيد الكربون، وحقن الغاز الطبيعي، وحقن النيتروجين. ويجب إجراء حقن الغاز القابل للامتزاج عند ضغط عال بما فيه الكفاية وذلك لضمان قابلية الامتزاج بين الغاز المحقون والنفط في الموقع الأصلي. ويجب تنفيذ قابلية الامتزاج عندما يكون التوتر البيني بين الطورين المائي والغازي منخفضاً جداً. وأي انخفاض في التوتر البيني يمكن أن يحسن من كفاءة الإزاحة. وتتضمن طرق الفَيض الحراري حقن الماء الساخن، والدفع بالبخار، والنقع البخاري، والاحتراق في الموقع الأصلي. وتم تصميم حقن أو توليد حرارة في المكمن لخفض لزوجة المائع الموجود في الموقع الأصلي وتحسين حركية المائع المزاح. ويمكن أيضاً استخدام طرق كهربائية لتسخين الموائع في المكامن الضحلة

نسبياً التي تحتوي على نفط ذي لزوجة عالية. وعملية الاستخراج الميكروبية المعزَّزة للنفط تستخدم حقن الكائنات الحية الدقيقة والمواد المغذية في وسط ناقل لزيادة استخراج النفط و/أو خفض إنتاج الماء في المكامن البترولية.

7.6 الوقود الأحفوري غير التقليدي

تشير «الطاقة النظيفة» تشيرا إلى الطاقة التي يتم توليدها بتلوث بيئي بسيط. والغاز الطبيعي هو مصدر للطاقة النظيفة. وتعتبر حقول النفط والغاز مصادر تقليدية للغاز الطبيعي. والمصادر غير التقليدية للغاز الطبيعي تتضمن ميثان الطبقة الفحمية التي ناقشناها في القسم 2.6، وهيدرات الميثان، ورمال الغاز المحكم، والغاز الصخري. والمصادر غير التقليدية الأخرى للوقود الأحفوري تتضمن النفط الصخري ورمال القار. سنقدّم في هذا القسم مقدمة عن الوقود الأحفوري غير التقليدي[7].

هيدرات الميثان

يشكل اصطياد جُزَيئات الغاز في الثلج عند درجات الحرارة المنخفضة مادة صلبة شبيهة بالثلج تسمى هيدرات (Hydrates) الغاز. وهيدرات الغاز هي كلاثرات (Clathrates)، وهو مركّب كيميائي معقد يتكوّن عندما يحصر أحد أنواع الجُزَيئات كاملاً نوعاً آخر من الجُزَيئات في الشبكة. وفي هذه الحالة من هيدرات الغاز، تشكّل الروابط الهيدروجينية لجُزَيئات الماء تركيباً شبيه بالقفص حيث تكون فيه جُزَيئات الغاز ممتصة أو مرتبطة. وهيدرات الغاز مع الميثان المرتبط تسمى هيدرات الميثان.

تعتبر هيدرات الغاز بشكل عام مشكلة بالنسبة إلى تشغيل حقل

النفط أو الغاز. على سبيل المثال، وجود الهيدرات على أرضية المحيط يمكن أن تؤثر في عمليات الحفر في أعماق المحيط. كما أن التدفق الآني للغاز الطبيعي والماء في شبكة الأنابيب أو خطوط الأنابيب يمكن أن تؤدي إلى تكوّن هيدرات الغاز التي تعيق أو تمنع تماماً تدفق المائع خلال شبكات خط الأنابيب. تسخين الغاز أو معالجة نظام الغاز ـ الماء بمضادات كيميائية يمكن أن تمنع تكوّن الهيدرات، إلا أنها سترفع من تكاليف التشغيل.

تعمل القدرة التجارية المأمولة لهيدرات الميثان كمصدر للطاقة النظيفة على تغيير الإدراك الصناعي لهيدرات الغاز. تحتوي هيدرات الميثان على مقدار كبير نسبياً من الميثان في التركيبة المعقدة للهيدرات. وتحتوي التركيبة المعقدة للهيدرات على حوالي 85 مولاً مئوياً من الماء وتقريباً 15 مولاً مئوياً من المواد المستضافة، حيث إن المواد المستضافة هي الميثان أو بعض الهيدروكربونات الأخرى ذات الوزن الجزيئي المنخفض نسبياً.

يمكن إيجاد هيدرات الميثان في جميع أنحاء العالم. فهي توجد على اليابسة في الرواسب للقطب الشمالي وعلى قيعان البحار حيث تكون المياه قريبة من التجمد. والصعوبات في الإنتاج المربح لهيدرات الميثان قد أعاقت إنتاج الميثان من الهيدرات.

رمال الغاز المحكم والغاز الصخري

تتضمن موارد الغاز غير التقليدية ميثان الطبقة الفحمية، ورمال الغاز المحكم، وصخور الغاز المتشققة. ناقشنا ميثان الطبقة الفحمية في القسم 2.6. كلاً من ورمال الغاز المحكم والغاز الصخري مميزان بنفاذيات منخفضة، أي النفاذيات التي هي جزء من الميللي دارسي (Millidarcy) (أقل من $10\ m^2$). والنفاذية المنخفضة المترافقة مع

موارد الغاز غير التقليدي تجعل إنتاج الغاز أكثر صعوبة بالمعدلات الاقتصادية.

يتطلب الإنتاج الاقتصادي للغاز من الصخر الغازي أو الرمل الغازي المحكم غالباً إحداث تشققات بواسطة عملية تعرف بإحداث تشقق هيدروليكياً. في هذه العملية، يتم حقن مائع في التكوين عند ضغط يتجاوز ضغط التشقق للتكوين. بعد إحداث التشققات في التكوين، يتم حقن دعامة مثل الحُبَيبات الرملية الخشنة أو الحُبَيبات الصناعية في التشقق لمنع التشقق من الانغلاق، أو الالتئام، عندما يُزال ضغط الحقن. توفّر الدعامة مسار تدفق ذا نفاذية عالية للغاز ليتدفق إلى بئر الإنتاج. تحتاج الصخور والرمال الغازية غير التقليدية ذات النفاذية المنخفضة غالباً إلى آبار لكل وحدة مساحة أكثر مما تحتاجه مكامن الغاز التقليدية ذات النفاذية الأعلى . وأهمية إدارة مورد الغاز غير التقليدي تكمن في تطوير المورد بآبار كافية لتحسين استخراج الغاز من دون حفر آبار غير ضرورية.

النفط الصخري ورمال القار

إن النفط الصخري (Shale Oil) هو نفط ذو ثقل-API عال. ويوجد في صخر الطفَل المسامي ذي النفاذية المنخفضة. وحُبَيبات الرمل المتماسكة مع بعضها بواسطة القار أو الإسفلت تسمى رمال القار (Tar Ssands). والقار والإسفلت هما هيدروكربونات صلبة أو بلاستيكية ولهما لزوجة عالية. وتوجد رواسب النفط الصخري ورمال القار منتشرة بشكل واسع في جميع أنحاء منطقة جبال الروكي (الجبال الصخرية) بأميركا الشمالية، وفي أجزاء مختلفة من العالم. وعلى الرغم من صعوبة الإنتاج، إلا أن حجم الهيدروكربون في رمال القار قد حفّز الجهود لتطوير تقنيات الإنتاج.

يمكن استخراج الهيدروكربون من النفط الصخري ورمال القار بالتعدين عندما تكون صخور النفط ورمال القار قريبة بما فيه الكفاية إلى السطح. وقد وُجدت حفر القار في جميع أنحاء العالم وكانت مصدراً للعديد من عظام الديناصور الأحفوري. وفي الأماكن التي تكون فيها صخور النفط ورمال القار عميقة جداً لتعدينها، ينبغي زيادة الحركية للهيدروكربون.

يمكن للزيادة في النفاذية أو النقص في اللزوجة أن يزيدا من الحركية. وزيادة درجة حرارة النفط ذي الثقل-API العالي، أو القار، أو الإسفلت يمكن أن يؤدّي إلى خفض اللزوجة بشكل ملحوظ. وإذا كانت هناك نفاذية كافية تسمح بالحقن، فإنه يمكن استخدام البخار أو الماء الساخن لزيادة درجة حرارة التكوين وخفض لزوجة الهيدروكربون. وفي معظم الحالات، على أيّ حال، تكون النفاذية منخفضة جداً مما يسمح بالحقن الهام للمائع الساخن. وقد استخدم التسخين بموجات الراديو في كندا، كما يتم تطوير تقنيات التسخين الكهرومغناطيسي لأجزاء أخرى من العالم.

تعليقات ختامية

1- المراجع عن تاريخ الوقود الأحفوري تتضمن نيف (Nef) [1977]، ويرجين (Yergin) [1992، وبصفة خاصة الفصل 1]، وكراوشار ورستاينن (Kraushaar and Ristinen)، [1993، الفصل 2]، وفان دايك (Van Dyke)، [1997، الفصول 4-6]، وشيفرد وشيفرد (Shepherd and Shepherd) [1998، الفصلان 4 و5].

2- المراجع عن الفحم تتضمن شيفرد وشيفرد [1998، الفصل 4]، وسيللي (Selley) [1998، وبصفة خاصة الفصل 5]، ووايزر

(Wiser) [2000، الفصلان 4 و5]، وبريس وسيفر (Press and Siever) [2001].

-3 معظم المناقشة عن الموائع البترولية مأخوذة من فانشي (Fanchi) [2001 و2002].

-4 المراجع عن تاريخ الحفر تتضمن يرجين [1992، وبصفة خاصة الجزء 1]، وفان دايك، [1997، الفصول 6.4].

-5 لمناقشة عن الفيزياء في الاستكشاف والتطوير، انظر كلارك وكلاينبرغ (Clark and Kleinberg) [2002].

-6 المزيد من المناقشات المفصلة عن عمليات الاستخراج المعزَّزة مقدّمة في مراجع مثل لايك (Lake) [1989]، وغرين وويلهايت (Green and Willhite) [1998].

-7 لمزيد من المناقشات عن الوقود الأحفوري غير التقليدي، انظر كاسيدي وغروسمان (Cassedy and Grossman) [1998، الملحق C]، وسيللي [1998، الفصل 9]، ووايزر [2002، الفصل 6].

تمارين

1.6 أ) عرق فحم عرضه 800 قدم، وطوله 1 ميل، وسماكة 10 أقدام. والحجم المشغول بواسطة الشبكة الصدعية هي 1 في المئة. ما هو حجم الفحم في عرق الفحم؟ عبّر عن إجابتك بالمتر المكعب (m^3).

ب) إذا كانت كثافة الفحم هي 1.7 ثقل ـ رطل لكل قدم مكعب (lbm/ft^3)، فكم طناً من الفحم يوجد في عرق الفحم؟

2.6 أ) افترض أن أيزوثرم لانغمير لعرق الفحم في التمرين (1.6) له حجم لانغمير مقداره 600 قدم مكعب معياري لكل طن من

الفحم (SCF/ton) وضغط لانغمير مقداره 450 رطلاً لكل بوصة مربعة مطلقة (psia). احسب حجم الغاز لكل طن من الفحم عند الضغط 1000 psia . عبّر عن إجابتك بوحدات SCF/ton، حيث 1 ton = 2000 lbm .

ب) كم مقدار الغاز المحتوَى في الفحم؟ عبّر عن إجابتك بالمتر المكعب (m^3).

3.6 جزيرة عبارة عن كتلة كبيرة من الرمل تعمل كحاجز. افترض أن هذا الحاجز الجزيري متوسط عرضه 3 أميال، ومتوسط طوله 10 أميال، ومتوسط سماكة 30 قدماً. ومتوسط المسامية للرمل هو تقريباً 25 في المئة. ما هو الحجم المسامي لهذا الحاجز الجزيري؟ عبّر عن إجابتك بالبرميل (bbl) وأيضاً بالمتر المكعب (m^3).

4.6 ارسم علاقة لثقل- API كدالة في الثقل النوعي للنفط للمدى $0.1 \leqslant \gamma_0 \leqslant 1.0$.

5.6 أ) استخدم قانون الغاز الحقيقي $PV = Zn\,RT$ لإيجاد علاقة عامة لعامل التكوين الحجمي للغاز Bg. استخدم الحرفين السفليين «S» و«r» للدلالة على الظروف السطحية والظروف المكمنية، على التوالي.

ب) احسب قيمة B_g مستخدماً $\{P_s = 14.7\text{ psia}, T_s = 60\ °F, Z_s = 1\}$ و $\{P_r = 2175\text{ psia}, T_r = 140\ °F, Z_r = 0.9\}$. عبّر عن B_g بوحدات قدم مكعب مكمني لكل قدم مكعب معياري (RCF/SCF).

ج) احسب B_g مستخدماً $\{P_s = 1\text{ atm}, T_s = 20\ °C, Z_s = 1\}$ و $\{T_r = 60\ °C, P_r = 15\text{ MPa}, Z_r = 0.9\}$. عبّر عن B_g بوحدة متر مكعب مكمني لكل متر مكعب معياري (Rm^3/Sm^3).

د) ما الفرق بين العملية الحسابية في (ب) والعملية الحسابية في (ج)؟

6.6 نريد أن نحفر بئر عمودي عمقه 5,000 ft. ونعلم من خبرتنا السابقة في المنطقة بأن لقمة الحفر ستكون فاعلة لمدة 36 ساعة قبل أن يتوجب استبدالها. ولقمة الحفر المتوسطة ستخترق 20 ft من الصخرة في المنطقة لكل ساعة من الحفر. ومرة أخرى ، واستناداً إلى خبرتنا السابقة، نتوقع بأن متوسط «الجولة» لاستبدال لقمة الحفر تستغرق حوالي 8 ساعات. والجولة هنا هي عملية سحب أنبوب الحفر، واستبدال لقمة الحفر، ثم إعادة لقمة الحفر الجديدة إلى أسفل الحفرة. باستخدام هذه المعلومات، احسب الزمن الذي سيستغرقه حفر البئر العمودي ذو العمق 5,000 ft. **تلميح**: قم بإعداد الجدول التالي:

الزمن التزايدي (hrs)	العمق التزايدي (ft)	الزمن التراكمي (hrs)	العمق التراكمي (ft)

7.6 أ) بيّن أن المعادلة (6.5.2) هي حل للمعادلة (6.5.1).

ب) ارسم علاقة بيانية لمعدّل التدفق كدالة في الزمن لبئر يُنتج 10,000 برميل في اليوم الواحد بمعدّلانحدار $a = 0.06$ لكل سنة. يجب التعبير عن الزمن بالسنوات، كما يجب أن يتفاوت ما بين 0 إلى 50 سنة.

ج) متى يهبط معدّل التدفق إلى أقل من 1,000 برميل في اليوم؟

8.6 بيّن أن $q^{-1} = at + qi^{-1}$ هي حل للمعادلة (6.5.1) مع $n = 1$. هذا الحل يعرف بالحل الانحدار التوافقي (Harmonic Decline Solution).

9.6 أ) احسب كفاءة الاكتساح الحجمي E_{Vol} وكفاءة الاستخراج RE من الجدول التالي:

S_{oi}	0.75
S_{oa}	0.30
المساحة المكتسحة	750 هكتاراً
المساحة الكلية	1000 هكتار
السماكة المكتسح	10 أمتار
السماكة الكلي	15 متراص
أهمل تأثيرات الانتفاخ: $B_{oi} \approx B_{oa}$	

ب) ناقش كيف يمكن تحسين كفاءة الاستخراج.

10.6 احسب معامل الانعكاس عند الخط الفاصل بين طبقتين بالخصائص التالية:

الطبقة 1: الكثافة الحجمية = 2.3 g/cc والسرعة الانضغاطية = 5000 m/s.

الطبقة 2: الكثافة الحجمية = 2.4 g/cc والسرعة الانضغاطية = 5500 m/s.

11.6 تم حفر بئر في منطقة غير معروفة بإنتاج البترول إلى عمق عمودي 9500 قدم، فاكتشف مكمن نفطي عند هذا العمق. تم تقدير الضغط الابتدائي للمكمن بأنه 6000 psia. ما هو التدرج في الضغط في حفرة البئر إذا كان الضغط عند سطح البئر هو 14.7 psia؟ عبّر عن إجابتك بوحدات psia لكل قدم (psia/ft). التدرج في الضغط هو التغيّر في الضغط مقسوماً على التغيّر في العمق.

12.6 أ) افترض أن مكمناً يغطي مساحة قدرها 1100 فدّان وسماكه 30 قدماً. متوسط المسامية للمكمن هو 18 في المئة ومتوسط التشبع

بالماء هو 35 في المئة. وبقية الحجم المسامي مشغول بالنفط بعامل تكوين حجمي قدره 1.2 RB/STB، حيث RB تدل على البرميل المكمني وSTB تدل على صهريج تخزين برميل من النفط. احسب حجم النفط في المكمن وعبّر عن إجابتك بوحدة STB.

ب) إذا كان عامل الاستخراج المتوقع هو 30 في المئة فكم من النفط سيتم استعادته؟ عبّر عن إجابتك بوحدتي MMSTB وm^3. ملاحظة: 1 MMSTB تساوي 1 مليون STB.

الفصل السابع

الطاقة الشمسية

تعتبر كل من الطاقة الأحفورية والطاقة النووية من أنواع الطاقة غير المتجددة. ويتم الحصول على الطاقة غير المتجددة من المصادر بمعدّل يتجاوز معدّل إعادة سد النقص في المصادر. على سبيل المثال، إذا كان المنشأ الحيوي للوقود الأحفوري صحيحاً، يمكننا القول إن الوقود الأحفوري متجدد على مدى ملايين السنين، إلا أن المخزون الموجود للوقود الأحفوري سيتم استهلاكه على مدى قرون. ولأننا نستهلك الوقود الأحفوري بمعدّل يتجاوز معدّل إعادة سد النقص، فإننا نعتبر أن الوقود الأحفوري غير متجدد. والتعليق هذا نفسه ينطبق على الوقود النووي مثل اليورانيوم، كما سنشاهد في الفصول اللاحقة. أما الطاقة الشمسية فتعتبر طاقة متجددة للأسباب التالية[1].

إن الطاقة المتجددة هي الطاقة التي يتم الحصول عليها من مصادر بمعدّل أقل من أو يساوي معدّل إعادة سد النقص في المصدر. وفي حالة الطاقة الشمسية، يمكننا استخدام فقط كمية الطاقة المتوفرة من الشمس. ولأن ما تبقى من عمر الشمس يقاس بملايين السنين، فإن معظم العلماء يعتبرون الطاقة الشمسية مخزوناً غير

ناضب للطاقة. وفي الحقيقة، إن الطاقة الشمسية من الشمس محدودة، إلا أنها متاحة للاستخدام بواسطة العديد من الأجيال. لذلك، تعتبر الطاقة الشمسية متجدّدة. ومصادر الطاقة المرتبطة بالطاقة الشمسية، مثل الرياح والكتلة الحيوية، تعتبر أيضاً متجدّدة.

يمكن تحويل أشعة الشمس إلى صور أخرى للطاقة بواسطة عمليات تحويل متعددة. يعتمد التحويل الحراري على امتصاص الطاقة الشمسية لتسخين سطح بارد. ويعتمد التحويل الحيوي للطاقة الشمسية على التمثيل الضوئي. ويولّد التحويل الفولتضوئي طاقة كهربائية عن طريق توليد تيار كهربائي نتيجة عملية ميكانيكية كمية. ويعتمد تحويل طاقة الرياح وطاقة المحيطات على التدرّجات في الضغط الجوي والتدرّجات في درجة حرارة المحيط لتوليد طاقة كهربائية. وسنركّز في هذا الفصل على التحويل الحراري. نناقش أولاً مصدر الطاقة الشمسية المتوفر، ونأخذ بعد ذلك تقنية الطاقة الشمسية في اثنين من أشكالها الثلاثة: الطاقة الشمسية السلبية (Passive Solar)، والطاقة الشمسية الفعّالة (Active Solar). والشكل الثالث للطاقة الشمسية، الكهرباء الشمسية، نناقشه في الفصل القادم. ونختتم هذا الفصل بمناقشة عن محطات الطاقة الكهربائية الشمسية.

1.7 الاندماج النووي: مصدر الطاقة الشمسية

إن الطاقة المنبعثة من أيّ نجم مثل الشمس تتولد بواسطة تفاعل الاندماج [بيرنشتاين وآخرون (Bernstein, et al.)، 2000، القسم 5.18]. وإذا ما أردنا أن نفهم مصدر الطاقة الشمسية، نحتاج إلى فهم بعض الأشياء عن الاندماج النووي[2]. سنقوم في هذا القسم بشرح موجز لاكتشاف النواة وتقديم مفاهيم الكتلة النووية وطاقة الترابط النووي. ونقوم بعد ذلك بشرح عملية الاندماج النووي في الشمس.

اكتشاف النواة

لقد شاهد الفيزيائي الألماني فيلهلم رونتجين (Wilhelm Roentgen) نوعاً جديداً من الأشعة تسمى الأشعة السينية (X-rays) في عام 1895 . وقد استطاعت أشعة رونتجين السينية أن تمر خلال الجسم وأن تكوّن صورة فوتوغرافية للتشريح الداخلي للجسم. كما اكتشف الفرنسي هنري بيكريل (Henri Becquerel) نشاطاً إشعاعياً في عام 1896 عندما كان يبحث عن أشعة رونتجين السينية في فَلْوَرِيَّة ملح اليورانيوم. وكانت الفيزيائية والطبيبة الفرنسية ماري كوري (Marie Curie) (سابقاً كان اسمها ماريا سكلودوسكا (Maria Sklodowska) من وارسو في بولندا) وزوجها بيار كوري (Pierre Curie) أول من نشر عن اكتشافهما لعنصر مشعّ جديد في عام 1898 . وقد سميا هذا العنصر باسم البولونيوم (polonium) نسبة إلى الوطن الأصلي لماري. حدّد إرنست رذرفورد (Ernest Rutherford) «الأشعة» المنبعثة من عناصر مشعّة وسماها أشعة α، β، وγ. واليوم نعرف بأن شعاع α هو نواة الهيليوم، وشعاع β الإلكترون، وشعاع γ هو الفوتون الطاقي. وبحلول عام 1913، كان رذرفورد وزملاؤه في مختبر كافنديش في كامبردج بإنجلترا قد استخدموا جُسَيمات α لقذف رقاقة معدنية واكتشفوا النواة. وقد تم تحديد مكونات النواة في ما بعد بأنها البروتون مع جُسَيم جديد متعادل كهربياً، وهو النيوترون. واكتشف جيمس تشادويك (James Chadwick) النيوترون في عام 1932 عندما كان يعمل في مختبر رذرفورد.

إن البروتون والنيوترون مصنّفان كنويان (Nucleons)، أو مكوِّنان أساسيان للنواة. والترميز لعدد المكوّنات الأساسية في النواة هو الرمز الذري $^{A}_{Z}X_{N}$، حيث X رمز العنصر الكيميائي، وZ العدد الذري (عدد البروتونات)، وN عدد النيوترونات، ويحقق عدد الكتلة A العلاقة التالية :

$$A = N + Z \tag{7.1.1}$$

إن عدد الإلكترونات السالبة الشحنة في الذرّة المتعادلة كهربياً، تساوي عدد البروتونات الموجبة الشحنة Z. وكتلة الذرّة أو النواة يعبّر عنها بدلالة وحدة الكتلة الذرية (Atomic Mass Unit)، أو AMU. وواحد amu تُعرَّف بحيث أن كتلة ذرّة متعادلة من الكربون-12 بالرمز الذري ${}^{12}_{6}C_6$ تساوي تماماً 12. والقيمة الحالية لوحدة الكتلة الذرية الواحدة هي 1.6605×10^{-27} kg.

لقد أدّت التركيبات الممكنة لمكوّنات النواة إلى نظام تصنيف استناداً إلى التعبيرات نويدة (Nuclide)، ونظير (Isotope)، ومتعادل النيوترون «أيزوتون» (Isotone)، ومتعادل عدد الكتلة «أيزوبار» (Isobar). والذرّة التي لها نفس العدد الذري Z وعدد الكتلة A تسمى نويدة. والنظائر هي النوى التي لها نفس العدد الذري Z ولكنها مختلفة في عدد النيوترونات N. على سبيل المثال، النظائر التي تظهر طبيعياً للكربون هي الكربون -12 (${}^{12}_{6}C_6$)، والكربون -13 (${}^{13}_{6}C_7$)، والكربون -14 (${}^{14}_{6}C_8$). إن الكربون-13 والكربون-14 هما نظيران مشعان وبالتالي فهما غير مستقران. والنظائر الثلاثية الهامة في الاندماج النووي هي مجموعة نظائر الهيدروجين: الهيدروجين بنواة بروتون (${}^{1}_{1}H_0$)، والديوتيريوم بنواة ديوترون (${}^{2}_{1}H_1$)، والتريتيوم بنواة تريتون (${}^{3}_{1}H_2$). والأيزوتونات هي النوى التي لها نفس عدد النيوترونات N ولكنها مختلفة في عدد البروتونات Z. والأيزوبارات هي النوى التي لها نفس عدد الكتلة A. ويجب عدم الخلط في المصطلح «أيزوبار» المستخدم لوصف النوى مع نفس المصطلح «أيزوبار» المستخدم للدلالة على الضغط الثابت في الديناميكا الحرارية. ويمكن التمييز بينهما من سياق النص الذي يتضمن المعنى.

الكتلة النووية وطاقة الترابط

إن كتلة النواة التي لها عدد كتلة A وعدد ذري Z تعطى بالعلاقة التالية:

$$m(N,Z) = Nm_n + Zm_p - \frac{B(N,Z)}{c^2} \qquad (7.1.2)$$

حيث m_n كتلة النيوترون، وm_p كتلة البروتون، وc سرعة الضوء في الفراغ، و$B(N, Z)$ طاقة ترابط النواة. وطاقة الترابط هي الطاقة المطلوبة لشطر النواة إلى مكوّناتها الأساسية (النويات).

إن رؤية النواة كقطرة سائلة هي إحدى الطرق المستخدمة لتقدير طاقة الترابط ونموذج القطرة السائلة للنواة تم تطويره أولاً من قِبَل فون فيزاخر (C. F. Von Weizsächer) في عام 1935 وتعامل مع النويات وكأنها ذرات في القطرة السائلة. وقد استُخدم نموذج القطرة السائلة لتطوير معادلة شبه تجريبية لطاقة الترابط على النحو التالي [سيرواي وآخرون (Serway, et al.) 1997، ص 542]:

$$B(N,Z) = c_1A + c_2A^{2/3} + c_3\frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} + c_4\frac{(N-Z)^2}{A} \qquad (7.1.3)$$

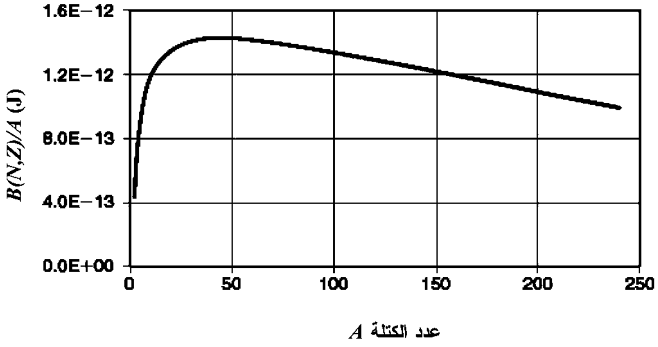
إن عدد الكتلة A دالة في N وZ ومعطى بالمعادلة (7.1.1). والمعادلة (7.1.3) تعطي تقريباً مقبولاً لطاقة الترابط. وأشير إلى هذه المعادلة بأنها «شبه تجريبية» لأن كلاً من حدودها مقترن بمفهوم فيزيائي، لكن المعاملات $\{c_1, c_2, c_3, c_4\}$ المضروبة في كل حد يتم حسابها بمطابقة المعادلة إلى البيانات التجريبية. الحد الأول (c_1A) في الطرف الأيمن للمعادلة (7.1.3) يُسمّى حد الحجم ويمثل التناسب بين طاقة الترابط والعدد الذري، والذي يتناسب مع حجم النواة. والحد الثاني ($c_2A^{2/3}$) يُسمّى حد السطح ويمثل حقيقة أن النويات على

سطح النواة في نموذج القطرة السائلة ليست محاطة بالكامل بواسطة النويات الأخرى. والحد الثالث $[C_3 Z(Z\text{-}1)/A^{1/3}]$ يمثل تنافر كولوم للبروتونات الموجبة الشحنة في النواة. والحد الرابع $[c_4(NZ)^2/\ A]$ يمثل الانخفاض في طاقة الترابط المشاهد في النوى الثقيلة مع زيادة في النيوترونات. والحد الرابع يساوي صفر عندما $N=Z$، ويصبح سالباً بشكل متزايد عندما $N\ Z$. وقيم المعاملات في المعادلة (7.1.3) هي:

$$c_1 = 2.5\times10^{-12}\,\mathrm{J},\ \ c_2 = -2.6\times10^{-12}\,\mathrm{J},\ \ c_3 = -0.114\times10^{-12}\,\mathrm{J},\ \ c_4 = -3.8\times10^{-12}\,\mathrm{J} \qquad (7.1.4)$$

ويمكن إضافة حدود أخرى إلى معادلة طاقة الترابط شبه التجريبية لتحسين حساب طاقة الترابط، إلا أن هذه الإضافات هي خارج نطاق هذا الكتاب.

يبيّن الشكل (1.7) طاقة الترابط لكل نوية، تم الحصول عليها من معادلة طاقة الترابط شبه التجريبية للنوى التي فيها $N=Z$. والمنحنى في هذا الشكل أكثر دقة عندما $A>24$. وللقيم الأقل من هذه القيمة، فإن طاقة الترابط المشاهدة لكل نوية لها عدد من القمم المتوافقة مع النويدات $\{^{24}Mg,\ ^{20}Ne,\ ^{16}O,\ ^{12}C,\ ^{8}Be,\ ^{4}He\}$. هذه النويدات لها أعداد كتلة تساوي العدد الصحيح لمضاعفات عدد الكتلة $A=4$ لنواة الهيليوم. وطاقة الترابط العالية لكل نوية لكل من هذه النويدات تبيّن أنها مستقرة جداً؛ مما يعني أنه يلزم طاقة عالية لشطر النواة إلى مكوّناتها.



الشكل (1.7): طاقة الترابط لكل نوية عندما $N = Z$

أعلى طاقة للترابط لكل نوية تكون بالقرب من القيمة القصوى عند $A \approx 45$. القوة النووية التي تربط النويات مع بعضها ممثلة بحد الحجم وهي المسؤولة عن الميل الموجب لطاقة الترابط لكل نوية للقيم $A < 45$. وتنافر كولوم بين البروتونات سببه الرئيسي هو الانحدار في طاقة الترابط لكل نوية عندما $A > 45$. ويمكن للطاقة أن تنطلق بتقسيم النواة إلى قسمين متشابهين عندما تكون A كبيرة بما فيه الكفاية، والذي هو ملاحظ أن يحدث تجريبياً عند الأعداد الكتلية التي تبلغ أقل قيمة لها في حدود $A \approx 120$ أو $A \approx 60$. وإن انقسام نواة كبيرة إلى قسمين متشابهين هو مثال على الانشطار التلقائي. والانشطار يمكن أيضاً أن يحدث عند إثارة نويدات ذات كتل كبيرة، مثل نظيري اليورانيوم ^{235}U أو ^{238}U، إلى مستوى طاقة أعلى . وعلى العكس من ذلك، يمكن أن تنطلق طاقة في عملية الاندماج عند اتحاد نواتين خفيفتين بقيم A لهما صغيرة جداً.

الاندماج الشمسي

ان درجة حرارة وكثافة المادة الموجودة في باطن النجم عاليتان جداً، ويقوم نيوترونين وبروتونين بإجراء سلسلة من التفاعلات

لتكوين نواة نظير الهيليوم الشائعة، ^4He. وفي عملية الاندماج هذه، هناك فقد صافي في الكتلة التي يتم تحويلها إلى طاقة إشعاعية.

إن الخطوة الأولى في سلسلة تفاعل الاندماج هي اتحاد بروتونين لتكوين نواة الديوتيريوم في التفاعل الآتي:

$$p + p \rightarrow d + e^{-} + \nu_e \qquad (7.1.5)$$

حيث ν_e هو نيوترينو الإلكترون. وتحتوي نواة الديوتيريوم على بروتون ونيوترون مرتبطين. وبمجرد أن تتكون نواة الديوتيريوم، يمكنها أن تتفاعل مع البروتون في التفاعل الآتي:

$$d + p \rightarrow {}^3He + \gamma \qquad (7.1.6)$$

لتكوين نواة نظير الهيليوم الخفيف ^3He مع فوتون أشعة غاما γ. ويتحد نظيران خفيفان للهيليوم في آخر تفاعل من سلسلة الاندماج التالي:

$$^3He + {}^3He \rightarrow {}^4He + 2p \qquad (7.1.7)$$

لتكوين ^4He مع بروتونين. ويمكن كتابة التفاعل الإجمالي للاندماج على النحو التالي:

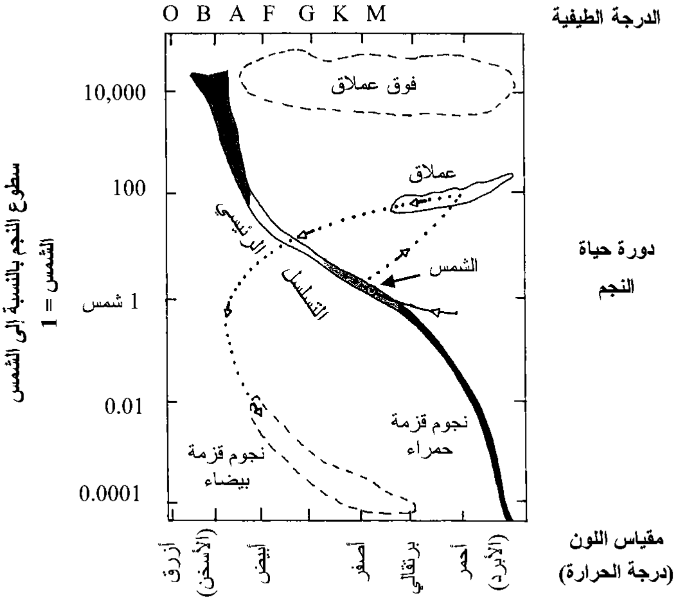
$$4p \rightarrow {}^4He + 2e^{-} + 2\nu_e \qquad (7.1.8)$$

وتفاعل الاندماج يطلق 26.7 MeV ($4.27\text{x}10^{-12}$ J) على شكل طاقة حركة وأشعة كهرومغناطيسية. تبدأ الطاقة المشعة كأشعة غاما وتتحول في النهاية إلى طيف شمسي ينير الأرض.

وهناك عملية اندماج أخرى تسمى الدورة الكربونية وتحدث في بعض النجوم [بيرنشتاين وآخرون، 2000، القسم 6.15]. تستخدم الدورة الكربونية الكربون -12(^{12}C) لتحفّز تكوّن ^4He في عملية متعددة الخطوات تشمل التكوّن المؤقت لنظيري النيتروجين والأكسجين. والدورة الكربونية يمكن أن تحدث فقط في النجوم التي تحتوي على مقدار كاف من الكربون–12 ليعمل كحافز في الدورة الكربونية. ولأن الكربون ينتج في مجموعة أخرى من التفاعلات النووية، فإن النجوم التي تولد اندماجاً في الدورة الكربونية لا تظهر إلا متأخراً نسبياً في نشأة الكون.

2.7 عمر النجوم

إن طول الفترة الزمنية التي ستكون فيها الطاقة الشمسية متاحة كمصدر للطاقة يعتمد على زمن الحياة للنجم. وتمر النجوم خلال مراحل مختلفة في أثناء زمن حياتها. وسلوك النجم كدالة في عمر النجم يُسمّى النشوء النجمي. وعرف الفلكيون بأن النشوء النجمي يعتمد على عوامل مثل الحجم الابتدائي للنجم وكتلته. يبيّن الشكل (2.7) رسماً بيانياً لسطوع النجم مقابل لون النجم. وكان أول من عمل مثل هذه الرسوم البيانية الفلكي الدنماركي إينار هيرتزسبرنغ (Ejnar Hertzsprung)، وأيضاً وبشكل مستقل الفلكي الأميركي هنري نوريس رسل (Henry Norris Russell). سميت هذه الرسوم البيانية باسميهما «هيرتزسبرنغ ـ رسل» (H-R) وقد أثبتت بأنها أداة قيّمة لفهم النشوء النجمي. وباستخدام مثل هذه الرسوم البيانية يمكننا عمل تنبؤ للتسلسل النشوئي لشمسنا.



الشكل (2.7): الرسم البياني هيرتزسبرنغ ـ رسل (H-R)

يبيّن الشكل (2.7) بأن شمسنا في الوقت الحاضر هي في التسلسل الرئيسي للنجوم. ومسار النشوء المستقبلي للشمس مبيّن بالخط المنقط في الشكل. فبعد بضع بلايين السنين من الآن، ربما خمسة، ستستنفذ شمسنا هيدروجينها. ومع نضوب هذا الوقود النووي، سينكمش لب الشمس وسيتمدد السطح الشمسي. سترتفع درجات الحرارة في اللب المنكمش؛ وسيتسع سطح الشمس ويكون أسطع. وفي النهاية، سيقوم السطح النجمي المتسع بابتلاع الكواكب الداخلية، بما في ذلك الأرض، لأن الشمس ستصبح نجماً عملاقاً. ومع مرور الوقت، ستستنفد الشمس باقي وقودها النووي، الهيليوم، وستستمر بمرحلة انهيار للجاذبية. ستضعف الطاقة المشعّة القادمة من الشمس مع تحوّل انهيار الشمس إلى نجم قزم أبيض. سيستمر

الانهيار حتى يتوقف كل من الانهيار والإشعاع. ستكون الشمس الميتة نجماً قزماً أسود، وسيجتاز معظم طاقتها وكتلتها الكون بحثاً عن موطن جديد للجاذبية.

الرسم البياني H-R هو نتيجة تجريبية يمكن تفسيره نوعياً بالأخذ في الاعتبار سطوع النجم (Luminosity)، أو الطاقة الكلية المشعة في الثانية الواحدة. وسطوع الشمس تقريباً 3.8×10^{26} W. ومقدار الأشعة القادمة من الشمس والواصلة إلى الغلاف الجوي للأرض هي تقريباً 1370 وات لكل متر مربع. وتسمى القيمة $1370\ \mathrm{W/m^2}$ بالثابت الشمسي (Solar Constant).

يتناسب السطوع النجمي L_{star} بشكل تقريبي مع مكعب كتلة النجم M_{star} وذلك للنجوم التي في التسلسل الرئيسي في الرسم البياني H-R. ويمكننا كتابة هذه العلاقة على النحو التالي:

$$L_{\mathrm{star}} = L_{\mathrm{s}}\left(\frac{M_{\mathrm{star}}}{M_{\mathrm{s}}}\right)^{3} \qquad (7.2.1)$$

حيث L_s سطوع شمسنا وM_s كتلتها. والنجوم ذات الكتل الأكبر لها سطوع أكبر وتحتاج إلى استهلاك أكبر للوقود النووي من النجوم ذات الكتل الأقل. وكتسلسل، فإن النجوم ذات الكتل الأكبر تميل إلى أن يكون لها زمن حياة أقصر من النجوم ذات الكتل الأقل. وقدّر سيلك (Silk) [2001، ص 439] زمن حياة نجم حارق للهيدروجين على التسلسل الرئيسي في الرسم البياني H-R بأنه:

$$t_{\mathrm{star}} = 10^{10}\left(\frac{M_{\mathrm{star}}}{M_{\mathrm{s}}}\right)^{-2} \text{ سنوات} \qquad (7.2.2)$$

عندما تقترب النجوم من نهاية زمن الحياة لها، والذي يتوافق بشكل تقريبي مع الزمن عند استنفاد وقودها النووي، فإنها تكون خاضعة لواحد من العديد من النهايات المقدّرة.

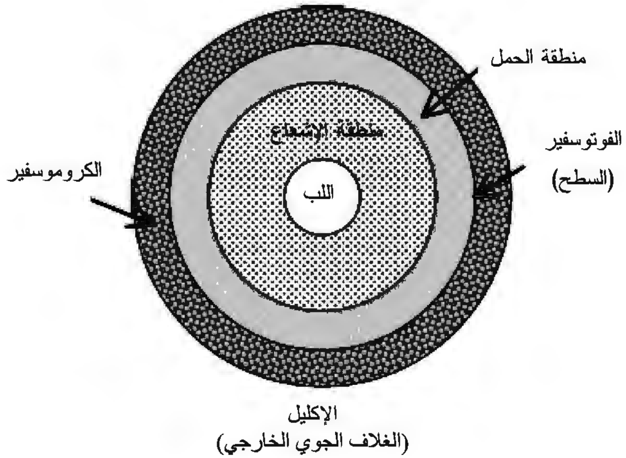
إن بعض النجوم تنفجر، ونواتج الانفجار ـ التي تسمى النجم المستعر (Nova) أو النجم الأعظم المستعرّ (Supernova) ـ تشتمل على الكثير من العناصر الثقيلة كحطام. وحطام النجم الأعظم المستعرّ يمكن أن يشكّل سديماً والذي منه قد تنشأ نجوم أخرى . ويُعتقد بأن انفجار النجم الأعظم المستعر هو مصدر المادة التي كوّنت شمسنا، والكواكب التابعة لها بما في ذلك الأرض، والكائنات الحية. وبعض النجوم الأخرى تنكمش بسهولة في أثناء برودتها وتصبح نجوماً قزمة بيضاء. وبقية النجوم الأخرى تمر بانهيار للجاذبية تحت تأثير وزنها إلى أن تصل إلى حالة كثيفة جداً تسمى حالة النجم النيوتروني. وفي حالات قليلة، الثقوب السوداء هي النتيجة النهائية لانهيار الجاذبية للنجم.

إن بعض الأجسام التي تشكّلت عن طريق التحام المادة في السحب السديمية ليست كثيفة بما فيه الكفاية لإشعال التفاعلات النووية. فقد تكون هذه الأجسام مأسورة بواسطة النجوم وتصبح أقماراً تابعة أو كواكب تابعة للنجم. والاضطرابات الصغيرة الباقية للتوزيع المادي في السديم قد يتم أسرها بواسطة الكواكب وتصبح أقماراً. وبعض الاضطرابات الأخرى تصبح أيضاً كويكبات، ومذنّبات، ونيازك، وهذه العملية تستمر كجزء من الكون اليوم.

3.7 الطاقة الشمسية

إن الطاقة الشمسية هي الطاقة المنبعثة من النجم. ويبيّن الشكل (3.7) تركيب النجم. لقد رأينا في القسم السابق بأن الطاقة المنبعثة من النجم تتولد بواسطة الاندماج النووي. وتحدث عملية الاندماج في لب أو مركز النجم. والطاقة المنطلقة بواسطة عملية الاندماج تنتشر مبتعدة عن اللب بالإشعاع من ذرّة إلى أخرى في منطقة الإشعاع

للنجم. ومع ابتعاد الطاقة من اللب ومرورها خلال منطقة الإشعاع، فإنها تصل إلى الجزء من النجم الذي تواصل فيه الطاقة رحلتها نحو سطح النجم كحرارة يصاحبها تدرّج حراري. هذا الجزء من النجم يُسمّى منطقة الحمل (Convection Zone). وسطح النجم، المسمى بالفوتوسفير (Photosphere)، يشعّ ضوءاً في الجزء المرئي من الطيف الكهرومغناطيسي. والنجم محاط بغلاف جوي نجمي يُسمّى الكروموسفير (Chromosphere). والكروموسفير عبارة عن طبقة من الغازات الساخنة تحيط الفوتوسفير.



الشكل (3.7): تركيب النجم

إن سطوع النجم هو الطاقة الكلية المشعّة لكل ثانية بواسطة النجم. وسطوع الشمس يساوي تقريباً 3.8×10^{26} W. الأشعة القادمة من الشمس تشبه الأشعة المنبعثة بواسطة الجسم الأسود عند درجة حرارة 6000 K [سورينسن (Sϕrensen)، 2000، ص 26]. وكمية الأشعة القادمة من الشمس والواصلة إلى الغلاف الجوي للأرض

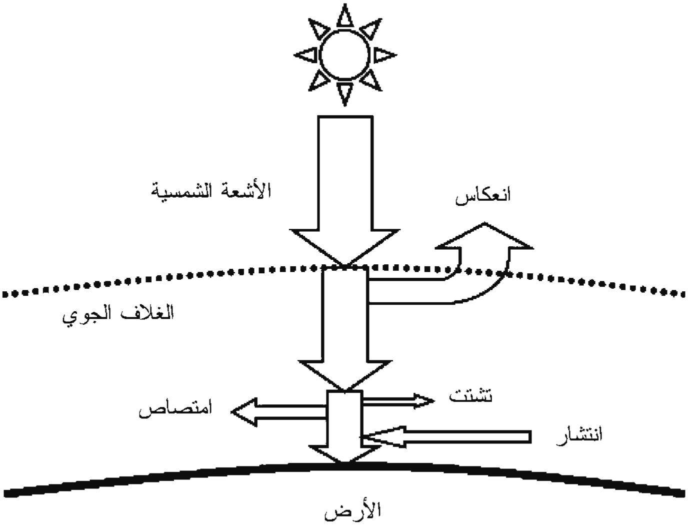
تسمى الثابت الشمسي وتساوي تقريباً 1370 وات لكل متر مربع. ويتغير الثابت الشمسي مع الزمن لأن محور الأرض مائل كما إن الأرض تتحرك في مدار بيضاوي حول الشمس. والمسافة الفاصلة بين نقطة على سطح الأرض والشمس تتغيّر على مدار العام. ولتمثيل هذا الاعتماد على الزمن، نكتب الثابت الشمسي بدلالة الزمن $S(t)$.

إن كمية الأشعة الشمسية التي تصل إلى سطح الأرض تعتمد على العوامل الموضحة في الشكل (4.7). وفيض الأشعة الشمسية الساقطة على سطح موضوع عند حافة الغلاف الجوي للأرض يعتمد على التوقيت اليومي والسنوي، وأيضاً على الموقع الجغرافي للسطح. ويمكن تحديد الموقع الجغرافي للسطح عن طريق خط عرضه θ_{lat} وخط طوله θ_{long}، وفيض الأشعة الشمسية الساقطة عند حافة الغلاف الجوي هو:

$$E_{inc}(t,\theta_{lat},\theta_{long}) = S(t)\cos\theta(t,\theta_{lat},\theta_{long}) \qquad (7.3.1)$$

حيث الزاوية θ $(t, \theta_{lat}, \theta_{long})$ هي الزاوية بين فيض الأشعة الشمسية الساقطة عند الزمن t والعمودي على السطح عند خط العرض θ_{lat} وخط الطول θ_{long}.

إن بعض الأشعة الشمسية الساقطة تنعكس بواسطة الغلاف الجوي للأرض. والجزء من الأشعة الشمسية التي تنعكس إلى الفضاء بواسطة نظام الأرض ـ الغلاف الجوي يُسمّى «البياض» (Albedo). والبياض يساوي تقريباً 0.35، وهو ناتج عن السحب (0.2)، وجُسَيمات الغلاف الجوي (0.1)، والانعكاس من سطح الأرض (0.05). وفيض الأشعة الشمسية الذي يدخل الغلاف الجوي يتم خفضه بواسطة البياض، أي إن:



الشكل (4.7): الأشعة الشمسية ونظام الأرض ــ الغلاف الجوي

$$E_{\text{atm}}(t,\theta_{\text{lat}},\theta_{\text{long}}) = E_{\text{inc}}(t,\theta_{\text{lat}},\theta_{\text{long}})(1-a) \quad (7.3.2)$$

وبمجرد أن تدخل الأشعة الشمسية إلى الغلاف الجوي، يمكن امتصاصها في الغلاف الجوي أو تشتيتها بعيداً عن سطح الأرض بواسطة جُسَيمات الغلاف الجوي مثل الهواء، والماء، والبخار، وذرات الغبار، والضباب. والبعض من الضوء المتشتت يصل في النهاية إلى سطح الأرض كضوء منتشر. والأشعة الشمسية التي تصل إلى سطح الأرض من قرص الشمس تسمى أشعة شمسية مباشرة إذا لم يتغير اتجاه انتشارها الأصلي.

الاحتباس الحراري العالمي

تقوم الأشعة الشمسية بتدفئة الأرض. ومتوسط درجة الحرارة عند سطح الأرض هو تقريباً 287 K، ويتفاوت عادة ما بين 220 K

و320 K [سورينسن، 2000، ص 26]. إن التغيّرات اليومية في درجة الحرارة هي بسبب دوران الأرض حول محورها. أما التغيّرات الفصلية في درجة الحرارة فهي نتيجة دوران الأرض حول الشمس وزاوية مَيَلان محور الأرض بالنسبة إلى مستوى مدار الشمس (Ecliptic Plane).

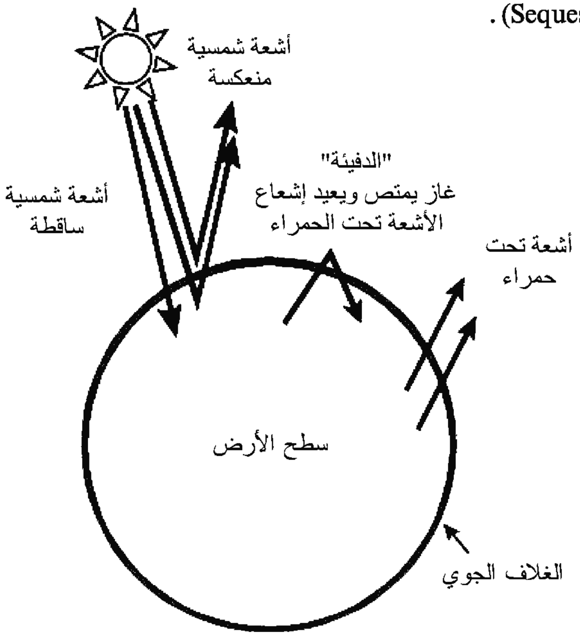
لاحظنا في الفصل السابق أن قياسات درجة حرارة الجو المحيط تبيّن تأثير الاحتباس الحراري العالمي الذي يدل على ارتفاع في متوسط درجة حرارة الغلاف الجوي للأرض[3]. والارتفاع في درجة حرارة الغلاف الجوي يمكن إرجاعه إلى مطلع القرن العشرين [لايد (Lide)، 2002، ص 14-32] ومقترن باحتراق الوقود الأحفوري. عندما يحترق الوقود الذي أساسه الكربون، فإن الكربون يمكن أن يتفاعل مع الأكسجين والنيتروجين في الغلاف الجوي لإنتاج ثاني أكسيد الكربون، وأول أكسيد الكربون، وأكاسيد النيتروجين (تختصر غالباً بالرمز NO_x). ونواتج الاحتراق، بما في ذلك بخار الماء، تنبعث إلى الغلاف الجوي في صورة غازية. إن بعض النواتج الغازية تسمى غازات الدفيئة (Greenhouse Gases) لأنها تقوم بحبس طاقة ضوء الشمس المنعكس من سطح الأرض وإعادة إشعاع الطاقة في صورة أشعة تحت حمراء. وغازات الدفيئة تشمل ثاني أكسيد الكربون، والميثان، والأكسيد النتري (أحد مكونات الضباب الدخاني)، بالإضافة إلى غازات أخرى مثل المركبات العضوية المتطايرة والهيدروفلوروكربون.

إن الاحتباس الحراري الناتج عن امتصاص ضوء الشمس المنعكس والانبعاث المتتالي للأشعة تحت الحمراء يُسمّى ظاهرة الدفيئة (Greenhouse Effect) لأن جدران الدفيئة تسمح لضوء الشمس بالدخول إلى الدفيئة ومن ثم احتجاز الأشعة تحت الحمراء المعاد

إشعاعها ثانية. وظاهرة الدفيئة موضحة في الشكل (5.7). إن بعض أشعة الشمس القادمة من الشمس يتم امتصاصها بواسطة الأرض، وبعضها تنعكس إلى الفضاء، وبعضها يتم أسْرها بواسطة مواد كيميائية في الغلاف الجوي ويعاد إشعاعها ثانية كأشعة تحت حمراء (حرارة). ولولا وجود غازات الدفيئة في الغلاف الجوي، فإن طاقة الأشعة المعاد إشعاعها كانت قد هجرت الأرض كضوء شمسي منعكس.

يمّثل ثاني أكسيد الكربون ما يقرب 83 في المئة من غازات الدفيئة التي تنبعث من الولايات المتحدة كجزء من مئة من الأطنان من الكربون أو الكربون المكافئ. أجرى وِيغلي وريشيلز وإدموندز (Wigley, Richels and Edmonds) [1996] دراسة للتنبؤ بتركيز الغلاف الجوي من غاز CO_2 خلال القرن الواحد والعشرين. تركيز الغلاف الجوي من غاز CO_2 قبل الثورة الصناعية كان في حدود 288 جزءاً في المليون. وتركيز الغلاف الجوي من غاز CO_2 حالياً هو عند 340 جزءاً في المليون. وتركيز غاز CO_2 الذي يشكّل اتزاناً طاقياً مقبولاً يفترض أن يكون 550 جزءاً في المليون. لتحقيق هذا التركيز المقبول من غاز CO_2 خلال القرن الحالي، يتوجب على المجتمع أن يخفض من حجم غازات الدفيئة الداخلة إلى الغلاف الجوي. ومعاهدة كيوتو (Kyoto Protocol) هي معاهدة دولية نوقشت في مدينة كيوتو باليابان في عام 1997 لوضع حدود لكمية غازات الدفيئة التي يمكن أن تنبعث من أيّ دولة إلى الغلاف الجوي. إلا أن معاهدة كيوتو لم توافق عليها جميع الدول. وتعتقد بعض الدول بأن الحدود التي وضعت لانبعاث غازات الدفيئة منخفضة جداً، وأنها ستؤثر سلباً على الأنظمة الاقتصادية الوطنية والعالمية من دون أن تحل مشكلة الاحتباس الحراري. والأبحاث جارية لتطوير التقنية اللازمة لأسْر

وتخزين غازات الدفيئة في تكوينات جيولوجية كوسيلة نافعة اقتصادياً للتخفيف من زيادة التركيز في غاز الدفيئة في الغلاف الجوي. وتخزين غازات الدفيئة بأسلوب مقبول بيئياً يُسمّى تنحية (Sequestration) .



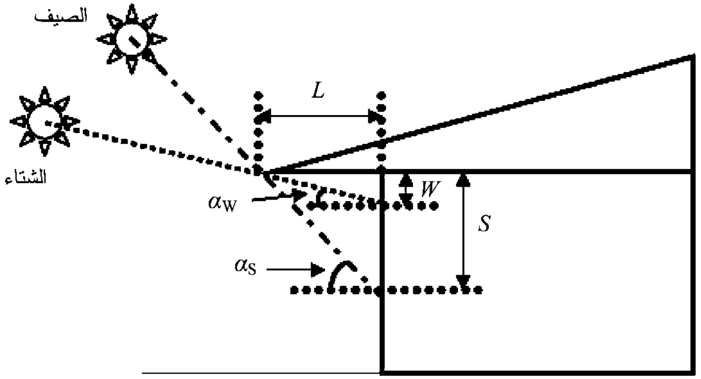
الشكل (5.7): ظاهرة الدفيئة

4.7 الطاقة الشمسية السلبية

إن تقنية الطاقة الشمسية السلبية تعمل على دمج تصميم المبنى مع العوامل البيئية التي تتيح احتجاز أو استبعاد الطاقة الشمسية. ولا تُستخدم أجهزة ميكانيكية في تطبيقات الطاقة الشمسية السلبية. وسنقوم بتوضيح تقنية الطاقة الشمسية السلبية بأخذ مثالين بسيطين ولكن هامّين: السقف المتدلّي والعزل الحراري.

السقف المتدلّي

إن ضوء الشمس الذي يسقط على سطح جسم ويؤدي إلى رفع درجة حرارة الجسم هو مثال على التدفئة الشمسية المباشرة. والتدفئة الشمسية المباشرة يمكن أن تؤدي إلى رفع درجة الحرارة الداخلية للمباني المحتوية على نوافذ. ويجب أن تكون النوافذ التي تسمح بدخول معظم ضوء الشمس مواجهة لجهة الجنوب في النصف الشمالي من الكرة الأرضية ومواجهة لجهة الشمال في النصف الجنوبي من الكرة الأرضية. يوضح الشكل (6.7) حالتين فصليتين؛ حيث يبيّن هذا الشكل بأن الارتفاع الأقصى للشمس في السماء يتغير من فصل إلى فصل بسبب زاوية ميلان محور الدوران للأرض بالنسبة إلى المستوى المداري للشمس. ومحور الدوران للأرض مائل بزاوية 23.5° عن الخط المتعامد مع المستوى المداري للشمس.



الشكل (6.7): السقف المتدلي

إن إحدى الطرق للتحكم بالتدفئة الشمسية المباشرة لمبنى به نوافذ هي بناء سقف متدلي. يُستخدم السقف المتدلي للتحكم بكمية ضوء الشمس الداخلة عبر النوافذ. يوضح الشكل (6.7) السقف

المتدلي. إن الجزء السفلي للنافذة يقع عند مسافة S من قاعدة السقف. ويمكن حساب طول السقف المتدلي L باستخدام العلاقة التالية من حساب المثلثات:

$$L = \frac{S}{\tan \alpha_S} \quad \text{أو} \quad L = \frac{W}{\tan \alpha_W} \qquad (7.4.1)$$

حيث الزاويتان والأطوال معرّفة في الشكل (6.7). وأقصر سقف متدل يمكن الحصول عليه إذا استُخدِمت زاوية الصيف α_S، بينما أطول سقف متدل يمكن الحصول عليه إذا استُخدِمت زاوية الشتاء α_W.

ويتحقق التبريد الشمسي السلبي عندما يلقي السقف المتدلي ظله على النوافذ المواجهة للشمس. في هذه الحالة، يتم تصميم السقف المتدلي بحيث يمنع ضوء الشمس، مع الطاقة المرافقة له، من الدخول إلى الجزء الداخلي للمبنى . وبدلاً من ذلك، يمكن أيضاً دهن النوافذ بمادة تقلل من كمية ضوء الشمس الداخلة إلى المبنى . وطريقة أخرى لتحقيق التبريد الشمسي السلبي أيضاً هي الجمع بين التظليل والتهوية الطبيعية.

إن التدفئة الشمسية السلبية هي احتجاز وتحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة حرارية. والتقنية المستخدمة للتدفئة الشمسية السلبية يمكن أن تكون بسيطة مثل استخدام حبل غسيل في الهواء الطلق لتجفيف الملابس، أو تصميم مبنى لاحتجاز ضوء الشمس خلال الشتاء. وفي الحالة الثانية، يجب توجيه المبنى بحيث يقوم بتجميع ضوء الشمس في أثناء الأوقات الباردة. ويمكن لضوء الشمس أن يدخل المبنى من خلال نوافذ موضوعة بشكل مناسب ولا يظللها السقف المتدلي، أو من خلال السقوف الشمسية. وبالتالي فإن ضوء الشمس يمكنه تدفئة الجزء الداخلي من المبنى ، ويمكنه أيضاً توفير ضوء طبيعي.

واستخدام ضوء الشمس لأغراض الإضاءة يُسمّى الإضاءة النهارية (Daylighting). وإجراء تصميم لأرضية مفتوحة في داخل المبنى يزيد من عامل تأثير الإضاءة النهارية ويمكنه أن يخفض كثيراً من تكاليف الإضاءة.

الموصلية الحرارية والعزل الحراري

يمكن منع الطاقة الشمسية من الجزء الداخلي لمبنى ببناء جدران لها عزل حراري جيد. ويمكن للعزل الحراري أن يخفض من استهلاك الطاقة لتكييف الهواء في الصيف والتدفئة في الشتاء. وجودة العزل الحراري لجدار بالشكل الهندسي المبيّن في الشكل (7.7) يمكن التعبير عنه بدلالة الموصلية الحرارية والمقاومة الحرارية[4].

إن معدّل التدفق الحراري خلال الجدار العازل المبيّن في الشكل (7.7) يعتمد على سماكة الجدار h_{wall}، ومساحة المقطع A المستعرضة مع اتجاه التدفق الحراري، والفرق في درجة الحرارة بين الوجهين المكشوف والداخلي. ويمكننا كتابة الفرق في درجة الحرارة عبر الجدار ΔT_{wall} كدرجة حرارة الوجه الخلفي المكشوف T_{high} ناقصاً درجة حرارة الوجه الأمامي الداخلي T_{low}، أي إن:

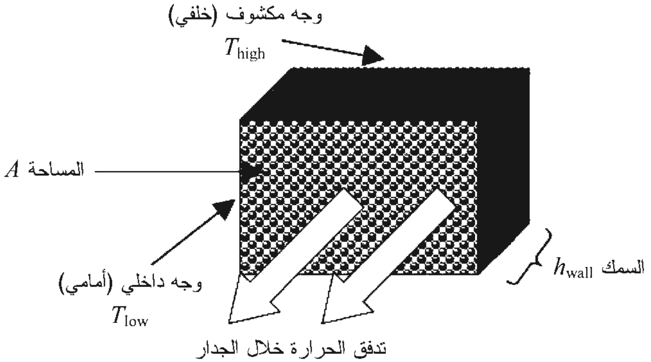
$$\Delta T_{\text{wall}} = T_{\text{high}} - T_{\text{low}} \tag{7.4.2}$$

ومعدّل التدفق الحراري خلال الجدار المعزول H_{wall} هو:

$$H_{\text{wall}} = k_{\text{wall}} A \frac{\Delta T_{\text{wall}}}{h_{\text{wall}}} = k_{\text{wall}} A \frac{T_{\text{high}} - T_{\text{low}}}{h_{\text{wall}}} \tag{7.4.3}$$

حيث k_{wall} ثابت التناسب ويُسمّى الموصلية الحرارية (Thermal Conductivity). والموصلية الحرارية هي مقياس للتدفق الحراري خلال المادة وتعتمد على نوع المادة. فالفلزات لها موصلية

حرارية عالية نسبياً. على سبيل المثال، الموصلية الحرارية للنحاس هي 385 w/(m.K). وبالمقابل، فإن الموصلية الحرارية للطوب العازل هي 0.15 w/(m.K).



الشكل (7.7): الموصلية الحرارية لجدار معزول

الصورة العامة للمعادلة (7.4.3) هي:

$$H_{\text{wall}} = \frac{dQ_{\text{wall}}}{dt} = -k_{\text{wall}} A \nabla T \qquad (7.4.4)$$

حيث Q_{wall} التدفق الحراري خلال الجدار و∇T التدرج في درجة الحرارة عبر الجدار.

ويمكن كتابة المعادلة (7.4.3) بدلالة المقاومة الحرارية R على النحو التالي:

$$H_{\text{wall}} = A \frac{T_{\text{high}} - T_{\text{low}}}{R} \qquad (7.4.5)$$

والموصلية الحرارية والمقاومة الحرارية مرتبطان بالعلاقة العكسية التالية:

$$R = \frac{h_{\text{wall}}}{k_{\text{wall}}} \qquad (7.4.6)$$

المقاومة الحرارية R تتناسب طردياً مع سماكة العازل الحراري

h_{wall}. وبزيادة سماكة العازل الحراري تزداد المقاومة الحرارية وينخفض التدفق الحراري خلال الجدار العازل. وباستخدام المثالين السابقين، فإن جداراً من النحاس بسماكة 1m وموصلية حرارية قدرها 385 W/ (m.k) له مقاومة حرارية مقدارها 1m/[385w/(m.k)] = 0.0026m^2 k/w. وبالمقابل، فإن جداراً من الطوب بسماكة 1m وموصلية حرارية قدرها 0.15W/(m.k) له مقاومة حرارية مقدارها 1m/ [0.15W/(m.k)] = 6.7 m^2. k/w.

لقد أخذنا العزل الحراري هنا كمثال لتقنية الطاقة الشمسية السلبية. والعزل الحراري أيضاً تقنية لحفظ الطاقة. فالعزل الحراري في الجدران يمكن أن تمنع الحرارة عن المبنى في الصيف ويحتفظ بالحرارة في الشتاء. وبالتالي، فإن العزل الحراري يمكن أن يخفض من الطلب للطاقة لتبريد المكان في الصيف وتدفئة المكان في الشتاء. وهذا يخفض من الطلب للطاقة، ويتيح إمكانية حفظ، أو تأجيل، استخدام الطاقة المتوفرة.

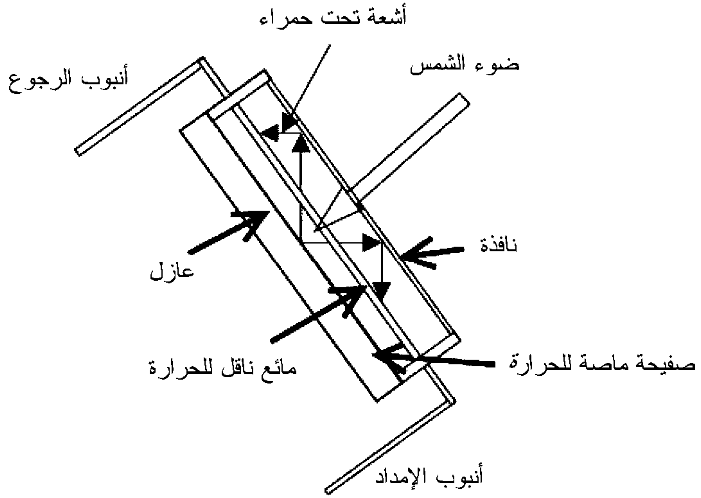
5.7 الطاقة الشمسية الفعالة

إن الطاقة الشمسية الفعّالة تعني تصميم وبناء الأنظمة التي تجمع وتحوّل الطاقة الشمسية إلى صور أخرى للطاقة مثل الطاقة الحرارية والطاقة الكهربائية. وتقنيات الطاقة الشمسية الفعالة هي عادة أنظمة ميكانيكية تُستخدم لتجميع وتركيز الطاقة الشمسية. سندرس المجمّعات الحرارية الشمسية هنا كتوضيح لتقنية الطاقة الشمسية الفعالة. والمثال الآخر لها، محطة الطاقة الكهربائية الشمسية، نناقشه في ما بعد في هذا الفصل.

المجمّعات الحرارية الشمسية

تقوم المجمّعات الحرارية الشمسية باحتجاز ضوء الشمس

وتحويل الطاقة الإشعاعية إلى طاقة حرارية. يبيّن الشكل (8.7) رسماً تخطيطياً لمجمِّع حراري شمسي. يدخل الضوء إلى المجمع من خلال نافذة مصنوعة من مادة مثل الزجاج أو البلاستيك. هذه النافذة مصممة لاستغلال حقيقة أن ضوء الشمس هو شعاع كهرومغناطيسي بتوزيع من الترددات. وتعتبر النافذة في المجمع الحراري الشمسي شفافة بالنسبة إلى الأشعة الشمسية الساقطة وغير شفافة بالنسبة إلى الأشعة تحت الحمراء.

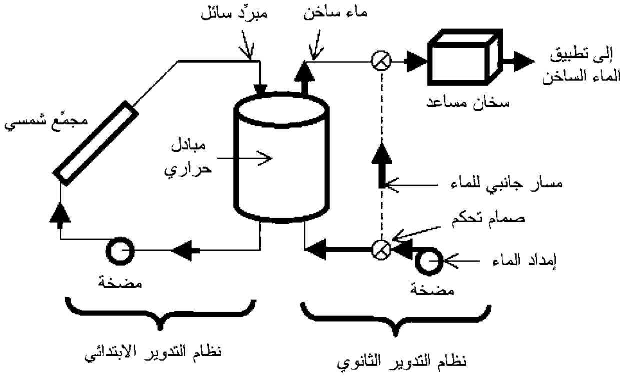


الشكل (8.7): المجمِّع الحراري الشمسي

إن الصفيحة الماصّة للحرارة في المجمع الحراري الشمسي عبارة عن سطح قاتم، مثل السطح النحاسي المسوَّد، يسخن بامتصاص الطاقة الشمسية. ويشعّ سطح الصفيحة الماصّة للحرارة أشعة تحت حمراء عندما يسخن. يدخل الضوء من خلال النافذة، فيتم امتصاصه بواسطة الصفيحة الماصّة، ثم يشعّ ثانية في صورة أشعة تحت حمراء. وتعمل الدفيئة على نفس هذا الأساس؛ حيث

تسمح جدران الدفيئة لضوء الشمس بالدخول ومن ثم يتم احتجاز الأشعة تحت الحمراء المشعة ثانية. ونافذة المجمع الحراري الشمسي ليست شفافة بالنسبة إلى الأشعة تحت الحمراء، وبالتالي يتم احتجاز الأشعة تحت الحمراء في المجمع.

يجب أن يكون للمجمع الحراري الشمسي وسيلة لنقل الطاقة المجمَّعة إلى طاقة مفيدة. يتم تدوير مائع ناقل للحرارة مثل الماء خلال المجمع المبيّن في الشكل (8.7) يقوم بنقل الحرارة إلى خارج المجمع لاستخدامها في مكان آخر. يوضح الشكل (9.7) نظام تسخين شمسي للاستخدام السكني أو التجاري.



الشكل (9.7): نظام التسخين الشمسي [كاسيدي وغروسمان (Cassedy and Grossman) [1998، ص 282]؛ وتقنيات الطاقة والبيئة (Energy Technologies and the Environment)، تقرير وزارة الطاقة الأميركية رقم DOE/EP0026 [كانون الثاني/يناير 1981].

إن نظام التسخين الشمسي المبيّن في الشكل (9.7) يستخدم الطاقة الشمسية لتسخين مبرِّد سائل مثل الماء أو مضاد للتجمد. ويستخدم المبادل الحراري الحرارة القادمة من المبرِّد السائل في نظام التدوير الابتدائي لتسخين الماء في نظام التدوير الثانوي. ويسمح

صمام التحكم الموجود في أسفل يمين الشكل بإضافة الماء إلى نظام التدوير الثانوي. ويتم تضمين سخان مساعد في أعلى يمين الشكل في النظام ليكمل إمداد الحرارة القادمة من المجمع الشمسي. وهذا تذكير بأن تجميع الطاقة الشمسية ليست عملية مستمرة. ويجب تضمين إمداد إضافي للطاقة أو نظام تخزين للطاقة الشمسية في تصميم نظام التسخين لضمان التوافر المستمر للحرارة من نظام التسخين الشمسي.

كفاءة تحويل الطاقة

إن درجة حرارة المجمّع الحراري الشمسي لا تزداد إلى حد غير محدد لأن نافذة وجدران المجمّع الحراري الشمسي لا يستطيعان منع الطاقة من التسرب بواسطة التوصيل والإشعاع. سيشعّ المجمّع إشعاعاً حرارياً وفقاً لقانون ستيفان ـ بولتزمان (Stefan-Boltzmann) عندما تكون درجة حرارته أكبر من درجة حرارة الوسط المحيط. وقانون ستيفان ـ بولتزمان يقول بأن صافي الطاقة ΔQ_{rad} المشعّة خلال سطح مساحته A بواسطة جسم عند وستزداد درجة حرارة مطلقة T مع وسط محيط عند درجة حرارة مطلقة T_e خلال فترة زمنية Δt هي:

$$\frac{\Delta Q_{\text{rad}}}{\Delta t} = Ae\sigma\left(T^4 - T_e^4\right) \tag{7.5.1}$$

حيث σ ثابت ستيفان ـ بولتزمان، وe الانبعاثية الحرارية للجسم عند درجة الحرارة المطلقة T. الانبعاثية الحرارية هي كمية لابُعدية، والانبعاثية الحرارية لجسم أسود تساوي 1. وستزداد درجة حرارة المجمع الحراري الشمسي حتى يتكوّن اتزان حراري.

ويجب أن يشتمل توازن الطاقة للاتزان الحراري على نتاج الطاقة (Output) وأيضاً فقد الطاقة (Loss)، أي إن:

$$E_{\text{input}} = E_{\text{output}} + E_{\text{loss}} \quad (7.5.2)$$

وكفاءة تحويل الطاقة η_{shc} للمجمع الحراري الشمسي بالتالي تعطى بالعلاقة التالية:

$$\eta_{shc} = \frac{E_{\text{output}}}{E_{\text{input}}} = 1 - \frac{E_{\text{loss}}}{E_{\text{input}}} \quad (7.5.3)$$

تعتمد الكفاءة η_{shc} على الزيادة في درجة حرارة المجمع الحراري الشمسي بالنسبة إلى درجة حرارة الوسط المحيط، وشدة الأشعة الشمسية، وجودة العزل الحراري. وأحد الأمثلة التي تعبّر عن الكفاءة η_{shc} لمجمع حراري شمسي بعزل تجاري هو:

$$\eta_{shc} = a_0 + b_0(T - T_{\text{amb}})\frac{I_{\text{smax}}}{I_s} \quad (7.5.4)$$

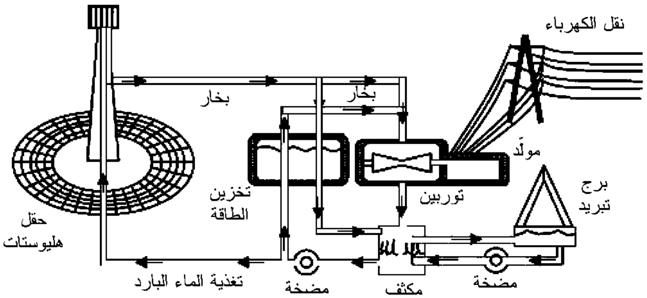
حيث a_0 وb_0 ثابتان تجريبيان، وT_{amb} درجة حرارة الوسط المحيط بالدرجة المئوية، T درجة حرارة المجمع الحراري الشمسي بالدرجة المئوية عند زمن معيّن، وI_s الشدة الشمسية الساقطة عند زمن معيّن، وI_{smax} الشدة الشمسية القصوى المشاهدة عند موقع المجمع الحراري الشمسي.

لقد قدّم هايدن (Hayden) [2001، ص 140] مثالاً لكفاءة تحويل الطاقة لمجمع حراري شمسي فيه الثابتان التجريبيان هما $a_0 = 80\ \%$، $b_0 = 80\%$، وعند موقع بأقصى شدة شمسية $I_{smax} = 950\ \text{W/m}^2$. إن الكفاءة η_{shc} هي جزء من مئة لهذين الثابتين، ودرجتا الحرارة T وT_{amb} هما بالدرجة المئوية. والإشارة السالبة في الثابت التجريبي b_0 تبيّن بأن الزيادة في درجة حرارة المجمع الحراري الشمسي T بالنسبة إلى درجة حرارة الوسط المحيط T_{amb} تؤدي إلى خفض الكفاءة؛ كما إن الانخفاض في الشدة الشمسية الساقطة I_s من قيمتها القصوى I_{smax} يؤدي إلى خفض الكفاءة. والشدة الشمسية الساقطة I_s يمكن أن تنخفض بأكثر من 50 في المئة بالنسبة إلى I_{smax} في الظروف الغائمة

(أو الضبابية). وكفاءة تحويل الطاقة الشمسية إلى حرارة تنخفض لأن هناك طاقة شمسية أقل تسقط على المجمع. والزيادة في درجة حرارة المجمّع الحراري الشمسي T بالنسبة إلى درجة حرارة الوسط المحيط T_{amb} تؤدي إلى خفض الشدة بسبب الفقد في الطاقة المصاحب للحمل والإشعاع الحراريين. والفقد في الطاقة عن طريق الحمل والإشعاع يؤدي إلى خفض كفاءة تحويل الطاقة.

6.7 محطات الطاقة الكهربائية الشمسية

قد بدأ المجتمع الآن بتجريب محطات الطاقة الكهربائية الشمسية، والبعض من هذه المحطات يتم تشغيلها تجارياً. ويتم تصميم محطات الطاقة الكهربائية الشمسية لتوفير الطاقة الكهربائية على نفس مقياس المحطات التي تعتمد على الوقود النووي أو الأحفوري. وتُستخدم مواد عاكسة مثل المرايا لتركيز الطاقة الشمسية. إن برج الطاقة الكهربائية الشمسية (Solar Power Tower) ومحطة التوليد الكهربائية الشمسية في جنوب كاليفورنيا مثالان على محطات الطاقة الكهربائية الشمسية، وسنقوم بشرحهما في القسمين التاليين.

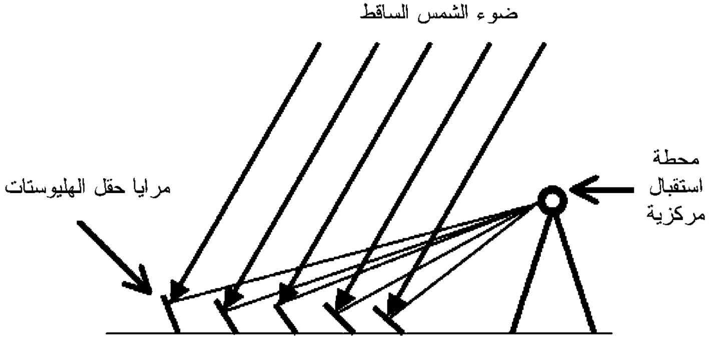


الشكل (10.7): رسم تخطيطي لبرج الطاقة الكهربائية الشمسية [كراوشار ورستاينن [1993، ص 172]؛ ومعهد أبحاث الطاقة الشمسية (حالياً المختبر الوطني الأميركي للطاقة المتجددة)، جولدن، ولاية كولورادو].

برج الطاقة الكهربائية الشمسية

يبيّن الشكل (10.7) رسماً توضيحياً لبرج طاقة كهربائية شمسية مع حقل هليوستات (Heliostat). وحقل الهليوستات هو حقل من المرايا الكبيرة التي تتعقب الشمس، وتسمى هذه المرايا الكبيرة هليوستات. تقوم الهليوستات بتركيز ضوء الشمس على مستقبِل في قمة البرج، فتقوم الطاقة الشمسية بتسخين مائع بداخل المستقبل.

يبيّن الشكل (11.7) توضيحياً للترتيب الهندسي للمرايا المتعقبة للشمس بالنسبة إلى محطة الاستقبال المركزية. يجب أن تكون الهليوستات قادرة على الدوران لكي تزيد من تجميع الضوء عند محطة الاستقبال المركزية. وتُستخدم كمبيوترات للتحكم في توجيه الهليوستات. وكلما ابتعدت حلقة الهليوستات عن البرج، أي كلما زاد الفاصل بين الحلقة وما جاورها، فإن الحلقات المتحدة المراكز يجب أن تزداد لتفادي وقوع الظل على إحدى حلقات المرايا بواسطة حلقة مجاورة.



الشكل (11.7): رسم توضيحي لبرج الطاقة الشمسية

إن أول محطة للطاقة الكهربائية الشمسية المستندة على فكرة برج الطاقة الكهربائية الشمسية بنيت في صحراء موجافي (Mujave)

بالقرب من مدينة بارستو بولاية كاليفورنيا في الثمانينيات من القرن المنصرم. واستخدمت محطة الطاقة الحرارية الشمسية في بارستو 1900 هليوستات لعكس ضوء الشمس على مستقبِل عند قمة برج ارتفاعه 300 قدم. ويولّد ضوء الشمس الحرارة لتكوين البخار، ويُستخدم البخار لتشغيل توربين أو يمكن تخزينه لاستخدامه لاحقاً. وأوضحت هذه المحطة الأولى لبرج الطاقة الكهربائية الشمسية، المسمّاة «سولار وان» (Solar One)، إمكانية تجميع الطاقة الشمسية وتحويلها إلى طاقة كهربائية. وكانت قدرة المحطة سولار وان 10 MWe . والمائع المستخدم لنقل الحرارة في هذه المحطة كان البخار. وتم التعديل في تجهيز المحطة سولار وان لتستخدم ملح النيترات المذاب كمائع لنقل الحرارة. وكان التجهيز المعدل، المسمّى «سولار تو» (Solar Two)، قادر على تحسين كفاءة نقل الحرارة والتخزين الحراري لمشروع القدرة الإيضاحي 10 MWe . وتم التمكن من استرجاع الملح الساخن عندما كانت هناك حاجة إلى غليان الماء لتحويله إلى بخار لتشغيل مولّد توربين [ملاحظة: أُلحقت e إلى الميغاواوت (MWe) فقط للدلالة على أن الناتج هو قدرة كهربائية. وعندما يكون الناتج قدرة حرارية، يلحق حرف t إلى الميغاوات (MWt) للتمييز بينهما، كما سيتم شرحه لاحقاً في القسم الرابع من الفصل 11].

أنظمة توليد الكهرباء الشمسية

يتكوّن نظام توليد الكهرباء الشمسية من حقل كبير من المجمعات الحرارية الشمسية ومحطة طاقة كهربائية تقليدية. ومحطات نظام توليد الكهرباء الشمسية في جنوب كاليفورنيا تستخدم صفوفاً من المجمّعات الحرارية الشمسية على شكل قطع مكافئ. والمجمّعات عبارة عن صفائح عاكسة، أو مرايا، متعقبة للشمس. يتم تركيز ضوء

الشمس المنعكس من الصفائح على أنابيب تحتوي على مائع ناقل للحرارة. يتم تسخين المائع وضخه خلال سلسلة من المبادلات الحرارية لإنتاج بخار ساخن جداً. يقوم البخار بإدارة توربين في مولد لإنتاج الكهرباء.

وللفترات الطويلة من الأحوال الجوية السيئة، يجب على محطات الطاقة الكهربائية الشمسية استخدام وقود مساعد بدلاً من ضوء الشمس. واستخدمت محطة نموذجية لنظام توليد الكهرباء الشمسية الغاز الطبيعي كوقود مساعد. ذكر جوسوامي وآخرون (Goswami, et al.) [2000، القسم 7.8] بأنه، في المتوسط، 75 في المئة من الطاقة المستخدمة بواسطة المحطة الكهربائية تم تزويدها بضوء الشمس، والـ 25 في المئة الباقية بالغاز الطبيعي. كما ذكروا أيضاً بأن كفاءات المجمّع الشمسي تراوحت ما بين 40 في المئة إلى 50 في المئة، وكفاءة التحويل الكهربائية كانت في حدود 40 في المئة، والكفاءة الكلية لتحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية كانت تقريباً 15 في المئة.

إن الكفاءة الكلية η_{SEGS} لنظام توليد الكهرباء الشمسية هي حاصل ضرب الكفاءة الضوئية η_o، وكفاءة التحويل الحراري η_c، والكفاءة الديناميكية الحرارية η_t، أي إن:

$$\eta_{SEGS} = \eta_o \eta_c \eta_t \quad (7.6.1)$$

وإن الكفاءة الضوئية هي مقياس لكمية ضوء الشمس المنعكس إلى النظام. والكفاءة الحرارية هي مقياس لكمية ضوء الشمس الذي تحول إلى حرارة من ضوء الشمس الداخل إلى النظام. والكفاءة الديناميكية الحرارية هي مقياس لكمية الحرارة التي تم تحويلها في النظام لتوليد الكهرباء.

يتم تصميم محطات نظام توليد الكهرباء الشمسية لإمداد الطاقة الكهربائية للمرافق المحلية خلال فترات الطلب القصوى . في جنوب كاليفورنيا، فترة الطلب القصوى هي وقت العصر من الصيف الحار عندما يكون الطلب عالياً لتكييف الهواء. وهذا توافق جيد لمحطة نظام توليد الكهرباء الشمسية لأن الشدة الشمسية تكون عالية. وفترات الطلب القصوى تتوافق أيضاً مع فترات التلوث العالية. وإحدى فوائد محطة نظام توليد الكهرباء الشمسية هي قدرتها على توفير الطاقة الكهربائية من دون انبعاث ملوثات الوقود الأحفوري مثل الأكسيد النتري (أحد مكونات الضباب الدخاني) وثاني أكسيد الكربون (أحد غازات الدفيئة).

تعليقات ختامية

1- تمت مناقشة مبادئ الفيزياء النووية في عدد من المصادر. انظر غارّود (Garrod) [1984، الفصل 8]، وولـيامز (Williams) [1991]، وسيرواي وآخرون (.Serway, et al) [1997، الفصل 13]، وبيرنشتاين وآخرون (.Bernstein, et al) [2000، الفصل 15]، وليلي (Lilley) [2001، وبصفة خاصة الفصلان 1 و10].

2- المراجع الأساسية المستخدمة للطاقة الشمسية هي سورينسن (Sφrensen) [2000]، وجوسوامي وآخرون [2000]، وبيرنشتاين وآخرون [2000]، وسيرواي وآخرون [1997].

3- اكتشاف خطر الاحتباس الحراري تم استعراضه من قِبَل ويرت (Weart) [1997]. ونوقش الاحتباس الحراري في عدد من المصادر، بما في ذلك وايزر (Wiser) [2000، الفصل 15]، وكراوشار ورستاينن [1999، الفصل 10]، وكاسيدي وغروسمان [1998، الفصل 6]، وإليوت (Elliot) [1997، الفصل 2].

4- انظر يونغ وفريدمان (Young and Freedman) [2000، ص 479-480] لمزيد من التفاصيل عن الموصلية الحرارية والمقاومة الحرارية.

تمارين

1.7 أ) احسب طاقة الترابط لكل نوية للنوى التي فيها عدد النيوترونات N تساوي عدد البروتونات Z وذلك لقيم Z في المدى $1 \leqslant Z \leqslant 120$.

ب) ارسم طاقة الترابط لكل نوية كدالة في عدد الكتلة A.

2.7 احسب القيمة القصوى لطاقة الترابط لكل نوية B/A في ما يتعلق بعدد الكتلة A. افترض أن عدد النيوترونات N يساوي عدد البروتونات Z. تذكر بأن $A = N + Z$ واحسب $(B/A) / A = 0$.

3.7 أ) احسب المساحة السطحية لكرة فيها الشمس عند مركزها ونصف قطرها يساوي واحد وحدة فلكية (Astronomical Unit)، والذي يمثل متوسط المسافة من الأرض إلى الشمس.

ب) استخدم الثابت الشمسي $1370\ W/m^2$ لحساب سطوع الشمس.

4.7 ضوء الشمس عبارة عن أشعة شمسية تنتشر قطرياً نحو الخارج من الشمس. ومتوسط المسافة من الأرض إلى الشمس هي حوالي $r_s = 150x10^{11}$ m، ونصف القطر الاستوائي للأرض هو تقريباً $r_e = 6.38x10^6$ m. احسب الجزء من ضوء الشمس الذي تم اعتراضه بواسطة الأرض .تلميح: افترض أن الأرض كرة نصف قطرها r_e وتتحرك في مدار دائري حول الشمس على بعد r_s.

5.7 أ) احسب زمن حياة نجم حارق للهيدروجين على التسلسل

الرئيسي في الرسم البياني H-R إذا كانت كتلة النجم هي ضعف كتلة الشمس. عبّر عن إجابتك بالسنوات.

ب) هل سطوع النجم أكبر من أو أقل من سطوع الشمس؟

6.7 أ) افترض أن الشمس هي عند 73.5° فوق الأفق في الصيف و26.5° فوق الأفق في الشتاء. احسب طول السقف المتدلي الذي سيظلل كلّياً نافذة في الصيف. قاعدة النافذة هي عند 2.0 m أسفل قاعدة السقف.

ب) كم يجب أن يكون طول السقف المتدلي إذا استخدمنا متوسط زاويتي الصيف والشتاء المعطاتين في (أ)؟

7.7 أ) المقاومة الحرارية R، أو قيمة-R، لعازل تعطى بالعلاقة التالية:

$$Q_h = \frac{A(T_{high} - T_{low})}{R}$$

حيث Q_h معدّل التدفق الحراري (BTU/hr) خلال جدار مساحة مقطعه $A\ (ft^2)$. وتتدفق الحرارة من أحد جانبي الجدار ذي درجة الحرارة الأعلى T_{high} (°F) إلى الجانب ذي درجة الحرارة الأقل T_{low} (°F). احسب معدّل التدفق الحراري خلال جدار ارتفاعه 8 ft وطوله 10 ft. والفرق في درجة الحرارة هي T_{high} - T_{low} = 60°F، وقيمة-R للجدار هي 15 (°F.ft²/BTU/hr).

ب) عبّر عن معدّل التدفق الحراري المحسوب في (أ) بنظام الوحدات SI.

8.7 أ) استخدم المعادلة (7.5.6) والبيانات في القسم 7-5 لرسم علاقة بيانية بين كفاءة تحويل الطاقة η_{shc} لمجمّع حراري شمسي بعزل تجاري والفرق في درجة الحرارة (T-Tamb). درجة الحرارة يجب أن تغطي المدى 0° C ⩽ (T-Tamb) ⩽ 90° C لدرجة

الحرارة المعبّر عنها بالدرجة المئوية. افترض أن الشدة الشمسية الساقطة Is هي نصف الشدة الشمسية القصوى I_{smax}. ملاحظة: يجب أن تكون الكفاءة في المدى $0\% \leqslant \eta_{shc} \leqslant 100\%$.

ب) كرر التمرين (أ) مفترضاً أن الشدة الشمسية الساقطة I_s تساوي الشدة الشمسية القصوى I_{smax}.

ج) قارن بين الرسمين اللذين حصلت عليهما من (أ) و(ب).

9.7 افترض أن مجمّعاً حرارياً شمسياً أكثر سخونة بمقدار 10° C من درجة حرارة الوسيط المحيط التي تبلغ 20° C. استخدم قانون ستيفان ـ بولتزمان لحساب صافي فيض الطاقة F_{rad} المشعة بواسطة المجمع. صافي فيض الطاقة هو صافي الطاقة المشعة لكل وحدة زمن لكل وحدة مساحة. افترض أن الانبعاثية الحرارية تساوي 1.

10.7 أ) الكفاءة الكلية η_{SEGS} لنظام توليد الكهرباء الشمسية هي حاصل ضرب الكفاءة الضوئية η_o، وكفاءة التحويل الحراري η_c، والكفاءة الديناميكية الحرارية $_t$. أوجد أدنى وأقصى كفاءة كلّية لمدى الكفاءة $0.70 < \eta o < 0.80$، $0.35 < \eta c < 0.50$، و$\eta t \approx 0.35$.

ب) إذا كان النظام معرّضاً إلى $2x10^9$ W من الأشعة الشمسية، احسب أدنى وأقصى قدرة يمكن أن يوفرها النظام مستخدماً الكفاءتين المحسوبتين في (أ).

11.7 أ) ترتيب من المرايا الشمسية يغطي مساحة 50 هكتاراً وله أقصى إنتاجية للقدرة الكهربائية 10 MWe. احسب متوسط ناتج القدرة من أجل عامل سعة 20 في المئة.

ب) كم عدد الترتيبات المكافئة من المرايا الشمسية سيتم الاحتياج إليها للحصول على متوسط ناتج قدرة 1000 MWe؟

ج) كم المساحة التي سيتم تغطيتها بالكيلومتر المربع (km^2) بواسطة هذه الترتيبات؟

12.7 أ) متوسط الشدة الشمسية السنوي في الولايات المتحدة هو تقريباً $200\ W/m^2$. إذا كان بالإمكان تحويل 100 في المئة من ضوء الشمس الساقط إلى طاقة نافعة، كم مساحة الأرض التي سيتم الاحتياج إليها بالمتر المربع (m^2) لتوفير 100 exajoules من الطاقة المستهلكة سنوياً في الولايات المتحدة في نهاية القرن العشرين؟

ب) مساحة قارة الولايات المتحدة (باستثناء ألاسكا وهاواي) هي تقريباً $8\times10^{12}\ m^2$. ما النسبة المئوية من هذه المساحة التي يمكن تغطيتها بمساحة الأرض المحسوبة في (أ)؟

الفصل الثامن

تقنية الكهرباء الشمسية

ناقشنا في الفصل السابق الطاقة الشمسية السلبية والفعالة. في هذا الفصل، نقوم بدراسة تقنية الكهرباء الشمسية. تستخدم تقنية الكهرباء الشمسية الطاقة الشمسية لتوليد الكهرباء مباشرة. سنبدأ دراستنا بتقديم مفاهيم من ميكانيكا الكم والتي تعطينا الخلفية التي سنحتاج إليها لتطوير معرفة عالية نسبياً بتقنية الكهرباء الشمسية. بعد ذلك، نقوم بتطبيق هذه الأفكار على موضوعين أساسيين لتقنية الكهرباء الشمسية هما الظاهرة الكهروضوئية (Photoelectric Effect) والأجهزة الفولتضوئية (Photovoltaic Devices).

1.8 مبدأ عدم اليقين لهايزنبرغ

وُلدت ثورة في الفيزياء في مطلع القرن العشرين أثّرت في فهمنا للطاقة اليوم[1]. قبل عام 1900 كان العلماء قادرين على استخدام الفيزياء الكلاسيكية لإسحق نيوتن، وكلارك ماكسويل، وكثيرين آخرين غيرهم للتفسير الفعلي لجميع القياسات التجريبية المعروفة. وفقط مشاهدات بعض التجارب صمدت أمام الهجوم الكثيف من قِبَل علماء القرن التاسع عشر النظريين. أضف إلى ذلك، فإن الفهم

النهائي لهذه التجارب تطلب إعادة تقييم، هذا إن لم يكن إسقاط، العديد من المفاهيم التي كانت مقبولة وواضحة سابقاً. إن ثبات سرعة الضوء في الفراغ، على سبيل المثال، تم فهمه فقط عندما رفض ألبرت إينشتاين فكرة نيوتن للمكان والزمان المستقلين المطلقين. والرابط الرياضي الناتج بين المكان والزمان له استدلالات فيزيائية مازالت قيد الدراسة اليوم. والمشاهدة الأخرى التجريبية، الأشعة المنبعثة بواسطة الأجسام السوداء الساخنة، تم تفسيرها عن طريق رفض مفهوم آخر كان قائماً لفترة طويلة: استمرارية الطاقة. تجربة الجسم الأسود التي ناقشناها في الفصل الثالث أسست فكرة أن الطاقة موجودة على هيئة حزم منفصلة تسمى «كمّات» (Quanta). وأحد النتائج الخاصة والهامة فلسفياً للنظرية الكمية هي مبدأ عدم اليقين (Uncertainty Principle) الذي افترضه الفيزيائي الألماني فيرنر هايزنبرغ[2] (Werner Heisenberg) في عام 1927.

افترض هايزنبرغ أن هناك حدّاً لمستوى المعرفة التي يمكن أن نحصل عليها عن الطبيعة. وأشار إلى أن موضع وكمية تحرك جُسَيم لا يمكن قياسهما بدقة مطلقة. عدم اليقين في الموضع Δx وكمية التحرك Δp في بعد واحد يجب أن يحققا عدم التساوي التالي:

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2} \qquad (8.1.1)$$

حيث $\hbar = h/(2\pi)$ وتنطق «h بار»، وh ثابت بلانك. وأحد الاختلافات الهامة بين الفيزياء الكلاسيكية وفيزياء الكم يتمثل في مبدأ عدم اليقين لهايزنبرغ. وبشكل خاص، فإن الفيزياء الكلاسيكية تتوافق مع الحالة التي تكون فيها $h \to 0$ ويمكن فيها تعيين كل من الوضع وكمية التحرك بدقة متناهية. وحقيقة أن ثابت بلانك قيمة محددة لا صفرية، ولو حتى صغيرة، يتضمن بأننا لا نستطيع قياس كل من الموضع وكمية التحرك إلى أدنى عدم يقين مطلق. والحد الذي أشار

إليه هايزنبرغ ليس شيئاً نستطيع خفضه بتحسين طرق قياسنا. فهو حد مفروض بالطبيعة.

لنفترض تجربة بسيطة كتوضيح. سنحاول قياس سرعة الكرة–8 المتدحرجة على طاولة البليارد. إن هذا الأمر يبدو بسيطاً بما فيه الكفاية حتى أننا نفترض أيضاً بأنه يجب ألا تتغير حركة الكرة–8 بواسطة قياساتنا. لنفترض أننا نحاول قياس سرعة الكرة–8 بقياس الزمن الذي تستغرقه لقطع مسافة معروفة بين علامتين (أ) و(ب). وهذا سيتيح لنا حساب السرعة للكرة–8. فما مدى دقة حساباتنا؟

إن دقة حساباتنا تعتمد على كيفية قياسنا للزمن والطول بدقة. فإذا كنا نستطيع قياس الزمن والطول إلى أيّ دقة نرجوها، فإننا نستطيع إيجاد سرعة الكرة–8 إلى نفس الدرجة غير المحدودة من الدقة. والمشكلة هي أن قياساتنا للزمن والطول لا يمكن إجراؤها بدقة تامة. لقياس الزمن والطول، يجب أيضاً الكشف عن الكرة–8 عند مرورها بالعلامتين (أ) و(ب). فكيف لنا أن نحدد بالضبط متى تمر الكرة–8 من العلامتين (أ) و(ب)؟

لنفترض أننا نطلق رصاصات من عند كل من هاتين العلامتين. ويتم إطلاق الرصاصات في اتجاه عمودي على مسار الكرة–8 وفي فترات زمنية منتظمة. يوضع صندوق من الرمل في كل من خطي إطلاق الرصاصات. ونطلق الرصاصات بتكرار ملائم بحيث إن إحدى الرصاصات على الأقل تصيب الكرة–8 عند مرورها بالعلامة. ستكون الرصاصات هي المقذوفات والكرة–8 هي الهدف. يتم الكشف عن الكرة–8 عندما يختل انتظام الرصاصات الداخلة إلى الصندوق الرملي. والمشكلة في هذه الطريقة واضحة. عندما تصيب الرصاصة الكرة–8 عند العلامة الأولى ، ستنحرف الكرة–8 بسبب التصادم. ونتيجة لذلك، حركة الكرة–8 ستتغير تماماً باستخدامنا لطريقة الكشف هذه.

بدلاً من الرصاصات، دعنا نستخدم البِلية (Marble) كمقذوف. بهذا الإجراء نحصل على طريقة أفضل لقياس سرعة الكرة-8 لأن انحراف الكرة-8 سيكون أقل عند اصطدامها بالبلية من اصطدامها بالرصاصة. ويمكن تحسين قياسنا بشكل أفضل أيضاً باستخدام جسم أصغر من البلية للكشف عن الكرة-8 عند مرورها بالعلامتين. وإذا استخدمنا جُسَيم الضوء، الفوتون، سنحصل على قياسات جيدة جداً لسرعة الكرة-8. ومع ذلك، فإن قياسنا ما زال غير دقيق مطلقاً لأن الأجسام دون المجهرية مثل الفوتون لا تزال تعمل على حرف الكرة-8، ولكن بمقدار ضئيل بحيث يمكن إهماله لمعظم الأغراض العملية.

نكرر الآن التجربة، إلا أننا سنستبدل الكرة-8 هدفنا بإلكترون. في هذه الحالة، لا يمكننا إهمال تأثير مقذوف الكشف، الفوتون، على قياسنا لسرعة الإلكترون لأن الخصائص الديناميكية للإلكترون والفوتون متشابهة. وعلى مقياس الجُسَيمات دون المجهرية، مثل الإلكترون والفوتون، فإنه من غير الممكن أن نخفض بشكل مطلق تأثير الشخص القائم بالتجربة على النظام قيد المشاهدة. وكما دوّن هايزنبرغ:

> **الصفة 1.8**: لقد كان دائماً يُفترض في الفيزياء الكلاسيكية إما أن هذا التفاعل (بين الشخص المشاهِد والشيء المشاهَد) صغير يمكن إهماله، أو عدا ذلك أن تأثيره يمكن حذفه من النتائج عن طريق الحسابات المستندة على تجارب «التحكم». هذا الافتراض غير مسموح به في الفيزياء الذرية؛ فالتفاعل بين الشخص المشاهِد والشيء المشاهَد يؤدي إلى تغيّرات كبيرة يتعذر التحكم بها في النظام قيد المشاهدة، بسبب خاصية التغيّرات غير المترابطة للعمليات الذرية [سامبرسكي (Sambursky)، 1975، ص 518].

يعتقد العلماء في الوقت الحاضر أن مبدأ عدم اليقين لهايزنبرغ ينطبق ليس فقط على الفيزياء الذرية ولكن أيضاً على جميع الظواهر الموصوفة بواسطة النظرية الكمية؛ بما في ذلك الظواهر التي تم تفسيرها بواسطة الفيزياء الكلاسيكية.

والأثر الفلسفي لمبدأ عدم اليقين لهايزنبرغ مذهل. لاحظ الفيزيائي والأمير الفرنسي لويس فيكتور دو برولي (Louis Victor de Broglie) أن مبدأ عدم اليقين لهايزنبرغ يجعل:

الصفة 2.8: «من المستحيل أن ننسب في وقت واحد إلى جسم حركة معرَّفة تماماً ومكاناً محدداً تماماً في الفراغ والزمان» [دو برولي، 1966، ص 122].

إذا كنا لا نستطيع بشكل يقيني تحديد كل من موقع وحركة جسم عند زمن معين، عندئذ تسقط حتمية الفيزياء الكلاسيكية. ومع ذلك، فقد رأينا كيف أن الفيزياء الكلاسيكية ناجحة في وصف نطاق واسع من الظواهر الطبيعية، وبصفة خاصة الظواهر العيانية. والنظرية الكمية تبرر نجاح الفيزياء الكلاسيكية باحتوائها للنظرية الكلاسيكية كحالة خاصة من النظرية الكمية الشاملة.

2.8 تتامية بوهر وازدواجية الموجة ـ الجُسَيم

ربما تكون قد لاحظت شيئاً غير عادي في شرحنا للنظرية الكمية حتى الآن. فقد استخدمنا الضوء كموجة وكجُسَيم في شرحنا للعمليات الكمية. كان الضوء يسلك كموجة في تجربة الجسم الأسود، وتم التعامل مع الضوء كجُسَيم في شرحنا لمبدأ عدم اليقين. فهل الضوء موجة وأيضاً جُسَيم؟ إذا قمنا بإجراء التجربة (أ) لتحديد

ما إذا كان الضوء موجة، فإننا سنجد أن الضوء يسلك كموجة. ومن جهة أخرى ، إذا قمنا بإجراء التجربة (ب) لتحديد ما إذا كان الضوء جُسَيماً، والذي يفترض أن لا يكون كذلك لأن الضوء سلك كموجة في التجربة (أ)، سنكتشف بأن الضوء يسلك كجُسَيم في التجربة (ب). فكيف يمكن أن يكون ذلك؟

إذا قمنا بتحليل تجربتنا بعناية، نكتشف بأن طرق قياسنا تجعل من المستحيل أن نقيس في وقت واحد الخصائص الموجية والجُسَيمية للضوء. وإذا قمنا بابتكار تجربة لقياس الخاصية الجُسَيمية للضوء، مثل تحديد موقع فوتون عند نقطة في الفراغ، وهي المعلومات التي نحتاج إليها لدراسة الخاصية الموجية للضوء في نفس الوقت، مثل الامتداد في كافة أنحاء الفضاء، سيكون من المستحيل تحقيقه في أسوأ الأحوال وغير دقيق في أحسن الأحوال. وبالمثل، فإن أيّ تجربة لقياس الخصائص الموجية للضوء ستكون غير قادرة على توفير معلومات دقيقة عن الخصائص الجُسَيمية للضوء. إن هذه القيود على تجاربنا ليست نتيجة أخطاء يمكن تصحيحها، بل هي قيود طبيعية مترافقة مع مبدأ عدم اليقين لهايزنبرغ. لذلك، يجب أن نتحدث عن ازدواجية الموجة ـ الجُسَيم: فالضوء يسلك كموجة وكجُسَيم بحسب ظروف التجربة. علاوة على ذلك، فقد أوضحت التجارب بأن ازدواجية الموجة ـ الجُسَيم تنطبق على جميع الأجسام دون المجهرية مثل الإلكترونات، والبروتونات، والنيوترونات.

إن ازدواجية الموجة ـ الجُسَيم يمكن تصوّرها كوصفين متتامين من الواقع. وكل تصور هو الصحيح لمدى محدود من التطبيقات، ولكن كِلا التصورين ضروري لتكملة الوصف. وهذا هو أساس قاعدة التتامية التي أعلنها الفيزيائي الدنماركي نيلز بوهر (Niels Bohr). بيّن بوهر بأن الفيزياء الكلاسيكية لم تعد بالإمكان أن تُستخدم لوصف

طيف الذرّة بشكل ملائم. فاستخدم بوهر فكرة الطاقة المكممة لحساب طيف الهيدروجين بشكل صحيح، ودافع عن قاعدة التتامية.

بعد سلسلة من النقاشات مع ألبرت إينشتاين، الذي اعتقد حتى وفاته بأن النظرية الكمية غير مكتملة، تم تبنِّي فكرة بوهر بأنها التفسير التقليدي لميكانيكا الكم وأصبحت تعرف باسم تفسير كوبنهاغن. فهي تمثل حالة نظام فيزيائي بدالة رياضية تعرف بالدالة الموجية (Wavefunction). وفي هذه الفكرة، فإن الدالة الموجية هي وصف كامل للمعرفة الذاتية للمشاهِد بدلاً من الحالة المتعلقة بالهدف للنظام المشاهَد. والمعرفة الجديدة عن النظام تغيّر من الوصف الرياضي للعلاقة بين الأنظمة الفيزيائية. ووفقاً لهايزنبرغ:

الصفة 3.8: عملية التسجيل ... ليست عملية فيزيائية، بل بالأحرى ، يمكن القول عنها، بأنها عملية رياضية. ومع التغير المفاجئ لمعرفتنا فإن التمثيل الرياضي أيضاً يمر بحالة من التغير المفاجئ [سامبرسكي، 1975، ص 518].

تغيُّر معرفتنا يتجسد في الدالة الموجية ويمكن تفسيره من وجهة النظر هذه بأنه اختزال للدالة الموجية. سنناقش تفسيرها بالتفصيل في القسم التالي.

3.8 فكرة الاحتمالية لبورن

قال الفيزيائي البريطاني الألماني المولد ماكس بورن (Max Born) بأن العملية الحسابية المستخدمة لوصف المشاهدات في النظرية الكمية يجب تفسيرها بدلالة الاحتمالات. والاحتمالات التي تهمنا هي الاحتمالات المتعلقة بالهدف الذي يمكن حسابه باستخدام عملية متكررة ومحددة تماماً. على سبيل المثال، عدد المرات الذي

يمكن لحدث أن يحدث في مجموعة النتائج الممكنة هو تكرار حدوث الحدث. وتكرار الحدوث يعتبر تقديراً لاحتمال حدوث الحدث.

يحقق الاحتمال بعض الخصائص الأساسية. لنفترض أننا عرّفنا احتمال مشاهدة حدث A في عينة فراغية S بأنها $P(A)$. والاحتمال يجب ألا يكون سالباً؛ واحتمال مشاهدة حدث واحد على الأقل في العينة الفراغية هو 1؛ واحتمال الحصول على مجموعة فارغة (لا يوجد حدث في العينة الفراغية) هو صفر. فإذا استخدمنا $\varnothing$ لتعريف المجموعة الفارغة، يمكننا عندئذ كتابة خصائص الاحتمال على النحو التالي:

$$P(A) \geq 0$$
$$P(S) = 1 \tag{8.3.1}$$
$$P(\varnothing) = 0$$

إذا كان الحدثان A ونقيضه اللا A (يرمز للنقيض بالرمز A') متتامين، فإن:

$$P(A) + P(A') = 1 \tag{8.3.2}$$

والاحتمالات يمكن أن تكون إما منفصلة أو متصلة. عند رمي نرد واحد (زهر الطاولة) ذي ستة أوجه فإننا نحصل على ست نتائج محتملة متساوية. واحتمال الحصول على نتيجة واحدة فقط من رمية واحدة للنرد هو احتمال منفصل. يمكننا تعريف الدالة $f(x)$ بأنها الاحتمال للمتغير العشوائي المنفصل X (مثل رمي النرد) بالنتيجة x (قيمة وجه النرد الذي يظهر بعد الرمي). والزوج المرتب $\{x, f(x)\}$ هو التوزيع الاحتمالي المنفصل إذا كانت:

$$f(x) \geq 0$$
$$\sum_x f(x) = 1 \tag{8.3.3}$$

حيث الجمع هو على جميع النتائج المحتملة. ومتوسط التوزيع

الاحتمالي المنفصل هو القيمة المتوقعة $E(X)$ للمتغير العشوائي المنفصل X المعرّف بالمعادلة التالية:

$$E(X) = \sum_{x} x\, f(x) \tag{8.3.4}$$

حيث الجمع هو على جميع النتائج المحتملة.

ويعرّف التوزيع الاحتمالي المتصل بدلالة كثافة الاحتمال $\rho(x)$ الذي يحقق الشرطين التاليين:

$$\rho(x) \geq 0$$
$$\int_{x} \rho(x)\, dx = 1 \tag{8.3.5}$$

حيث التكامل هو على جميع النتائج الممكنة. لاحظ أن التوزيع الاحتمالي المنفصل يخضع لقاعدة الجمع المتمثلة بالمعادلة (8.3.3) والتوزيع الاحتمالي المتصل يخضع لقاعدة التكامل المتمثلة بالمعادلة (8.3.5). ومتوسط التوزيع الاحتمالي المتصل هو القيمة المتوقعة $E(X)$ للمتغير العشوائي المتصل X المعرّف بالمعادلة التالية:

$$E(X) = \int_{-\infty}^{\infty} x\, \rho(x)\, dx \tag{8.3.6}$$

حيث التكامل هو على جميع النتائج الممكنة.

والتوزيع الاحتمالي المتعلق باثنين أو أكثر من التوزيعات الاحتمالية يُسمّى التوزيع الاحتمالي المشترك. على سبيل المثال، التوزيع الاحتمالي المشترك لمتغيرين عشوائيين متصلين X وY يمكن كتابته على الصورة $\rho(x,y)$، وهذا يجب أن يحقق المتطلب غير السلبي $\rho(x, y) \geqslant 0$ لجميع قيم (x,y) التي تحقق شرط العيارية (Normalization) التالي:

$$\int_{x}\int_{y} \rho(x,y)\, dx\, dy = 1 \tag{8.3.7}$$

يمكن الحصول على التوزيع الاحتمالي الحدّي من التوزيع

الاحتمالي المشترك بالجمع على أحد المتغيرين العشوائيين المنفصلين أو التكامل على أحد المتغيرين العشوائيين المتصلين. ففي حالة التوزيع الاحتمالي المشترك لمتغيرين عشوائيين $\rho(x,y)$، لدينا التوزيعان التاليان للاحتمال الحدّي:

$$\rho(y) = \int_x \rho(x,y)\,dx \qquad (8.3.8)$$
$$\rho(x) = \int_y \rho(x,y)\,dy$$

وإذا قمنا بقسمة التوزيع الاحتمالي الحدّي على التوزيع الاحتمالي المشترك، سنحصل على التوزيعين الاحتمالين الشرطيين $\rho(xo|y)$ و $\rho(y|x)$، أي إن:

$$\rho(y|x) = \frac{\rho(x,y)}{\rho(x)} \qquad (8.3.9)$$
$$\rho(x|y) = \frac{\rho(x,y)}{\rho(y)}$$

وفي حالة التوزيع الاحتمالي الشرطي، نقول إن $\rho(x|y)$ تعني احتمال الحصول على x بمعلومية y.

إن الملاحظات التي وضعناها هنا للمتغيّرين العشوائيين المتصلين يمكن تطبيقها بعد إجراء التعديلات المناسبة على المتغيّرين العشوائيين المنفصلين. في حالة المتغيرين العشوائيين المنفصلين، يتم استبدال التكامل على المتغيّرين العشوائيين المتصلين بالجمع على المتغيّرين العشوائيين المنفصلين. وكِلا المتغيّرين العشوائيين المنفصلين والمتصلين موجود في ميكانيكا الكم. وقبل أن نناقش ميكانيكا الكم، سنأخذ بعض الأمثلة على التوزيعين الاحتماليين المنفصل والمتصل.

مثال 1.3.8: لوحة لعبة السهام

لنفترض توزيع الحروف المبيّنة في «لوحة لعبة السهام» في

الجدول (1.8). يوجد 16 عنصراً في هذا الجدول. وكل عنصر يحتوي على حرف واحد {a,b,c} إما على شكل حرف كبير {A,B,C,} أو على شكل حرف صغير {a,b,c}. ويحتوي الجدول على ثلاثة حروف مختلفة {a,b,c} في حالتين مختلفتين {U = حرف كبير، وL = حرف صغير}. نفترض أن كل عنصر سيتم إصابته بنفس الاحتمال عن طريق رمي السهم. الاحتمال المشترك لإصابة حرف معرّف بالرمز λ بحالة الحرف المعرّفة بالرمز k هو:

$$P(\lambda,\kappa)=\frac{N(\lambda,\kappa)}{N} \qquad (8.3.10)$$

حيث N العدد الكلي للعناصر و$N(\lambda, \kappa)$ عدد العناصر التي تُظهر الحرف λ بحالة الحرف κ. في مثالنا هذا، عدد العناصر بحالة الحرف الكبير «A» مثلاً هي $N(\text{a,U})$ وعدد العناصر بحالة الحرف الصغير «a» هي $N(\text{a, L})=6$.

الجدول (1.8) لوحة لعبة السهام

B	a	b	C
c	B	B	a
a	A	C	a
B	a	a	B

والاحتمال الحدّي لحالة الحرف k هي:

$$P(\kappa)=\sum_{\lambda}\frac{N(\lambda,\kappa)}{N}=\frac{N(\kappa)}{N} \qquad (8.3.11)$$

حيث $N(\kappa)$ العدد الكلي للعناصر بحالة الحرف κ. والاحتمال الشرطي لظهور الحرف λ، بمعلومية حالة الحرف κ هو:

$$P(\lambda|\kappa)=\frac{P(\lambda,\kappa)}{P(\kappa)}=\frac{N(\lambda,\kappa)}{N(\kappa)} \qquad (8.3.12)$$

وينطبق الاحتمال الشرطي على مجموعة مختزلة من الأحداث الممكنة. كتوضيح، إذا كانت حالة الحرف هي الحرف الصغير $(k=L)$، عندئذ ستكون لدينا لوحة مختزلة للعبة السهام كما هي مبيّنة في الجدول (2.8) للاحتمال الشرطي $p(\lambda|L)$. وفي مثالنا، فإن الاحتمال المشترك للحصول على الحرف b وحالة الحرف الصغير هو $p(b|L)=1/16$ والاحتمال الشرطي للحصول على الحرف b بمعلومية أن حالة الحرف هي الحرف الصغير هو $p(b/L)=1/8$.

الجدول (2.8) لوحة مختزلة للعبة السهام

	a	b	
c			a
a			a
	a	a	

مثال 2.3.8: التوزيع الاحتمالي المنتظم المنفصل

لنفترض أن لدينا متغيراً عشوائياً منفصلاً x يمكن أن يكون له عدد n من النتائج. هذا المتغير العشوائي المنفصل x لديه التوزيع الاحتمالي المنتظم إذا كانت دالة الاحتمال له هي:

$$f(x)=\frac{1}{n} \tag{8.3.13}$$

رمي زهر الطاولة ذي الستة أوجه يخضع للتوزيع الاحتمالي المنتظم مع $n=6$.

مثال 3.3.8: التوزيع الاحتمالي الأسّي

المتغير العشوائي المتصل X لديه التوزيع الاحتمالي الأسّي إذا كانت كثافة الاحتمال له هي:

$$\rho(x)=\frac{\exp(-x/m)}{m}, \quad x>0 \tag{8.3.14}$$

حيث m هي المتوسط (أو القيمة المتوقعة $E(X)$) للتوزيع. والتوزيع الاحتمالي الأسّي يمكن استخدامه لوصف اضمحلال عنصر مشع.

4.8 معادلة شرودنجر اللانسبية

إن فكرة بورن، نظرية الاحتمالات، والتعاريف الأساسية للعمليات الفيزيائية هي في صميم اشتقاق معادلة لحساب المجالات اللانسبية لميكانيكا الكم. سنبدأ باشتقاق معادلة المجال اللانسبي لجُسَيم واحد بافتراض وجود كثافة الاحتمال الشرطي $\rho(\vec{x}|t)$. إن الرمز $\vec{x}$ لمتجه الموضع يدل على مجموعة من ثلاث إحداثيات للجُسَيم في الحجم الفراغي L^3 بحيث أن $\rho(\vec{x}|t)$ لها قيم لا صفرية. والمركّبة ذات الرتبة j لمتجه الموضع يمكن كتابتها على الشكل x^j حيث الدليل $j=1,2,3$ يدل على المركّبات الفراغية. ويُكتب الدليل كحرف فوقي لأسباب فنية، والصورة المفكوكة لـ $\rho(\vec{x}|t)$ هي كثافة الاحتمال الشرطي $p(x^1,x^2,x^3|t)$.

هذه ملاحظة حول الترميز المستخدم هنا. في الفراغ الإقليدي، يمكن كتابة طول المتجه بعدة طرق متكافئة، أي إن:

$$x\cdot x=\vec{x}\cdot\vec{x}=x_1^2+x_2^2+x_3^2=\sum_{j=1}^{3}x^j x_j=\sum_{i=1}^{3}\sum_{j=1}^{3}g_{ij}x^i x^j, \quad x^j=x_j \tag{8.4.1}$$

وعناصر المصفوفة في الفراغ الإقليدي $\{g_{ij}\}$ هي:

$$g_{ij}=\begin{bmatrix}1&0&0\\0&1&0\\0&0&1\end{bmatrix} \tag{8.4.2}$$

وتسمّى المصفوفة $\{g_{ij}\}$ «الممتد المتري» (Metric Tensor). وتعتمد عناصر الممتد المتري على نظام الإحداثيات الذي نعمل

عليه. والدليل j يمكن خفضه أو رفعه باستخدام الممتد المتري، أي إن:

$$\sum_{j=1}^{3} g_{ij} x^j = x_i, \quad \sum_{j=1}^{3} g^{ij} x_j = x^i \tag{8.4.3}$$

في حالة الممتد المتري للفراغ الإقليدي المبيّن في المعادلة (8.4.2)، لا يوجد فرق بين x^j وx_j. وهذا ليس صحيحاً في الفراغات الأخرى ، كما سنرى في الفصل التاسع. المتجه الذي مركّباته $\{x^j\}$ يُسمّى «متجه التباين المعاكس» (Contravariant Vector)، والمتجه الذي مركّباته $\{x_j\}$ يُسمّى «متجه التباين المشترك» (Covariant Vector). ومتجهات التباين المعاكس هي المتجهات التي تعرفت عليها عند دراستك للفيزياء في السنة الأولى الجامعية.

من المستحسن إعادة كتابة المعادلتين (8.4.1) و(8.4.3) باستخدام اصطلاح إينشتاين الجمعي. قدّم إينشتاين ترميزاً بأن الجمع يتم تضمينه في الدليل إذا ظهر الدليل مرتين في الحد الواحد. وبذلك، يمكن كتابة المعادلتين (8.4.1) و(8.4.3) على النحو التالي:

$$x \cdot x = \vec{x} \cdot \vec{x} = x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 = x^j x_j = g_{ij} x^i x^j, \quad x^j = x_j \tag{8.4.4}$$

و:

$$g_{ij} x^j = x_i, \quad g^{ij} x_j = x^i \tag{8.4.5}$$

حيث إن اصطلاح إينشتاين الجمعي قد بسّط الترميز. والوسائل الرياضية التي قمنا بشرحها في المعادلات من (8.4.1) إلى (8.4.5) أكثر تعقيداً مما قمنا بمناقشته في هذا الفصل، إلا أن الرياضيات تكون ذات أهمية عند دراسة الجُسَيمات التي تتحرك بسرعة قريبة من

سرعة الضوء c في الأنظمة النسبية. ولهذا، من الأفضل تقديم المفاهيم الآن بحيث يمكننا استخدامها بشكل مألوف قبل دراسة التطبيقات الأكثر تعقيداً في الفصل التاسع.

الرمز t هو عامل تقدم لا نسبي يشترط كثافة الاحتمال $\rho(\vec{x}\,|\,t)$. وعامل التقدم اللانسبي t يتم تفسيره كزمن في حالة نيوتن، أي إنه يزداد برتابة وهو زمن مطلق. وتفسير معنى عامل التقدم اللانسبي t يصبح هامّاً في الفصل القادم عندما ندرس التمدد النسبي لميكانيكا الكم.

كثافة الاحتمال الشرطي $\rho(\vec{x}\,|\,t)$ تمثل احتمال مشاهدة جُسَيم عند الموضع x في الفراغ عند الزمن t. معادلات المجال التي نشرحها في ما يلي يجب حلها لحساب التوزيع الاحتمالي.

وفقاً لنظرية الاحتمالات، فإن $\rho(\vec{x}\,|\,t)$ يجب أن تكون مقدار موجب محدد، أي:

$$\rho(\vec{x}\,|\,t) \geq 0 \qquad (8.4.6)$$

كما يجب أن تكون قابلة للعيارية (Normalizable) على تكامل الحجم، أي:

$$\int_{E^3} \rho(\vec{x}\,|\,t)\, d^3x = 1 \qquad (8.4.7)$$

حيث:

$$d^3x = dx^1 dx^2 dx^3 = \prod_{j=1}^{3} dx^j \qquad (8.4.8)$$

عند تطبيقها على جُسَيم، تقول المعادلة (8.4.7) إن الجُسَيم يُشاهد في مكان ما في الفراغ عند جميع الأزمان. ونعرف الآن بأن

الكثير من الجُسَيمات عمرها قصير؛ فهي يمكن أن تختفي في عملية تعرف باضمحلال الجُسَيم. هناك مراجعة للمعادلة (8.4.7) نناقشه في الفصل التاسع.

بقاء (أو حفظ) الاحتمال يتضمن بأن تخضع $\rho(\vec{x}\,|\,t)$ لمعادلة الاستمرارية التالية:

$$\frac{\partial\rho(\vec{x}\,|\,t)}{\partial t}+\sum_{j=1}^{3}\frac{\partial\rho(\vec{x}\,|\,t)v^j}{\partial x^j}=0 \qquad (8.4.9)$$

حيث ρv^j هي المركّبة ذات الرتبة j لتدفق الاحتمال للجُسَيم، أي إن تدفق الاحتمال يساوي كثافة الاحتمال مضروباً في المركّبة ذات الرتبة j لسرعة الجُسَيم. ويمكن كتابة المعادلة (8.4.9) باستخدام اصطلاح إينشتاين الجمعي للأدلة اللاتينية على الصورة:

$$\frac{\partial\rho(\vec{x}\,|\,t)}{\partial t}+\partial_j\rho(\vec{x}\,|\,t)v^j=0, \qquad \frac{\partial\rho(\vec{x}\,|\,t)v^j}{\partial x^j}\equiv\partial_j\rho(\vec{x}\,|\,t)v^j \quad (8.4.10)$$

حيث قمنا بالجمع على الرمز اللاتيني j وقد عرّفنا الترميز $\partial_j \cong \partial/\partial x^j$.

والتوزيع الاحتمالي $\rho(\vec{x}\,|\,t)$ يحقق المتطلب الموجب المحدد $\rho(\vec{x}\,|\,t)$ إذا قمنا بكتابة $\rho(\vec{x}\,|\,t)$ على الصورة التالية:

$$\rho(\vec{x}\,|\,t)=\psi^*(\vec{x},t)\psi(\vec{x},t) \qquad (8.4.11)$$

حيث الدالة ψ^* هي المرافق المركب (Complex Conjugate) للدالة ψ. وتسمى الدالة ψ بعدة تسميات: الدالة الموجية، والدالة المسموحة (Eigenfunction)، ودالة الحالة، ودالة بساي (psi)، وسعة الاحتمال هي بعض التسميات الشائعة للدالة ψ. وماكس بورن هو أول من اقترح تفسيراً للدالة ψ في سياق نظرية الاحتمالات. وصياغة

النظرية الكمية المقدمة هنا توضح العلاقة بين النظرية الكمية ونظرية الاحتمالات.

ويمكن كتابة الدالة ψ على الصورة التالية:

$$\psi(\vec{x},t) = [\rho(\vec{x}\,|\,t)]^{1/2} \exp[i\xi(\vec{x},t)] \tag{8.4.12}$$

حيث الطور (x,t) دالة قياسية حقيقية. ومن أجل هدفنا، نلاحظ أن الكمية القياسية هي الكمية التي ليست لها مركّبة اتجاهية. ومن الأمثلة الفيزيائية على الكميات القياسية تتضمن درجة الحرارة والكتلة. وعلى العكس من ذلك، فإن الكميات المتجهة مثل السرعة المتجهة (velocity) والقوة لهما مقدار واتجاه.

معادلات المجال الميكانيكية الكمية يمكن اشتقاقها من الشكلية الاحتمالية بالتعبير عن سرعة الجُسَيم على النحو التالي:

$$v^j(\vec{x},t) = \frac{1}{m}\left[\hbar \frac{\partial \xi(\vec{x},t)}{\partial x_j} - \frac{e}{c} A^j(\vec{x},t)\right] \tag{8.4.13}$$

حيث $\hbar$ ثابت بلانك مقسوماً على 2π $(\hbar = h/2\pi)$. والمتجه A في المعادلة السابقة هو الجهد المتجهي الذي عرّفناه في الفصل الثاني. آخذين في الاعتبار هذه الافتراضات، فإن معادلة المجال لجُسَيم متفاعل مع مجال كهرومغناطيسي ستكون على النحو التالي:

$$i\hbar \frac{\partial \psi(\vec{x},t)}{\partial t} = \left[\frac{\pi^j \pi_j}{2m} + U_I\right]\psi(\vec{x},t) \tag{8.4.14}$$

حيث U_I هو جهد التفاعل. والمؤثر التفاضلي:

$$\pi^j = \frac{\hbar}{i}\frac{\partial}{\partial x_j} - \frac{e}{c}A^j = \frac{\hbar}{i}\partial^j - \frac{e}{c}A^j \tag{8.4.15}$$

يُسمّى مؤثر كمية التحرك (Momentum Operator) وله وحدات

كمية التحرك. كما تسمى المعادلة (8.4.14) مع المعادلة (8.4.15) بمعادلة شرودنجر (Schroedinger Equation). وفي هذه الصياغة، فإن تعريف القيمة المتوقعة لما يمكن مشاهدته Ω هو:

$$\langle \Omega \rangle = \int_{L^3} \psi^* \Omega \psi \, d^3x \tag{8.4.16}$$

وأحد الأمثلة على ما يمكن مشاهدته هو متجه الموضع $\vec{x}$. سنوضح كيفية استخدام هذه المعادلة بأخذ مسألة بسيطة نسبياً لجُسَيم غير متفاعل.

مثال 1.4.8: الجُسَيم الحر في النظرية الكمية

النظام غير المتفاعل يتوافق مع الشرطين $\{A^{ij}\}=0$ و $U_I=0$ بحيث تصبح المعادلة (8.4.14) كالتالي:

$$i\hbar \frac{\partial \psi_f}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi_f \tag{8.4.17}$$

حيث قد قمنا بتعريف المؤثر اللابلاسي (Laplacian Operator) على النحو التالي:

$$\nabla^2 \psi_f = \left[\frac{\partial^2}{\partial (x^1)^2} + \frac{\partial^2}{\partial (x^2)^2} + \frac{\partial^2}{\partial (x^3)^2} \right] \psi_f = \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right] \psi_f \tag{8.4.18}$$

في نظام الإحداثيات الديكارتي (الكارتيزي). والمعادلة (8.4.17) لها الحل التالي:

$$\psi_f(\vec{x},t) = \eta^{1/2} \exp\left[-\frac{i\hbar}{2m} \left(k^j k_j \right) t + i k_j x^j \right] \tag{8.4.19}$$

حيث η ثابت يتم حسابه من متطلب عيارية الاحتمال، ونحن نستخدم اصطلاح إينشتاين الجمعي. ومقدار المتجه الثابت $\vec{K}$ هو العدد الموجي ويتناسب عكسياً مع الطول الموجي. والمتجه $\vec{K}$ مرتبط بكمية تحرك الجُسَيم بالعلاقة المبينة أدناه. وإذا قارنت المعادلة

(8.4.19) بالمعادلة (8.4.12) تستطيع تحديد الدالة القياسية الحقيقية $(\vec{x},t)$. كثافة الاحتمال $\rho(\bar{x}|\,t) = \psi^*(\bar{x},t)\,\psi\,(\bar{x},t)$ هي كثافة الاحتمال المنتظم التي تعتمد على حدود التكامل في المعادلة الشرطية للعيارية (8.4.7).

القيمة المتوقعة لسرعة الجُسَيم هي:

$$\langle v^j \rangle = \int_{L^3} \psi_f^* \pi^j \psi_f \, d^3x = \frac{1}{m} \int_{L^3} \psi_f^* \left[\frac{\hbar}{i} \frac{\partial}{\partial x_j} \right] \psi_f \, d^3x \qquad (8.4.20)$$

وبتعويض المعادلة (8.4.19) في المعادلة (8.4.20) يعطينا:

$$\frac{d\langle x^j \rangle}{dt} = \langle v^j \rangle = \frac{\hbar \langle k^j \rangle}{m} = \frac{\langle p^j \rangle}{m} \qquad (8.4.21)$$

حيث قمنا بربط كمية تحرك الجُسَيم بالعدد الموجي. والعلاقة التي تربط بينهما هي:

$$\langle p^j \rangle = \hbar \langle k^j \rangle \qquad (8.4.22)$$

وتوضح المعادلة (8.4.22) بأن الخصائص الميكانيكية للجُسَيم يمكن ربطها بعلاقة بالخصائص شبه الموجية. بتكامل المعادلة -4-21) (8 من t إلى $t+\delta t$ يعطينا:

$$\delta \langle x^j \rangle = \frac{\hbar \langle k^j \rangle}{m} \delta t = \frac{\langle p^j \rangle}{m} \delta t \qquad (8.4.23)$$

وتعبّر المعادلة (8.4.23) مسار الجُسَيم الحر بدلالة القيم المتوقعة لمركّبات متجه الموضع ومركّبات متجه كمية التحرك.

الطاقة المكمّمة

يظهر مفهوم الطاقة المكممة عندما نحل معادلة شرودنجر باستخدام حل على الصورة:

$$\psi(\vec{x},t)=\eta^{1/2}\psi_{\mathrm{E}}(\vec{x})\exp\left[-\frac{iEt}{\hbar}\right] \qquad (8.4.24)$$

بتعويض المعادلة (8.4.24) في المعادلة (8.4.14) نحصل على :

$$E\psi_{\mathrm{E}}(\vec{x})=\hat{H}\psi_{\mathrm{E}}(\vec{x}) \qquad (8.4.25)$$

حيث $\hat{H}$ (تنطق «H هات») هي المؤثر الهاميلتوني (Hamiltonian Operator):

$$\hat{H}=\frac{\pi^j\pi_j}{2m}+U_{\mathrm{I}}=\frac{1}{2m}\left(\frac{\hbar}{i}\frac{\partial}{\partial x_j}-\frac{e}{c}A^j\right)\left(\frac{\hbar}{i}\frac{\partial}{\partial x^j}-\frac{e}{c}A_j\right)+U_{\mathrm{I}} \qquad (8.4.26)$$

المؤثر $\hat{H}$ في ميكانيكا الكم يقابله دالة هاميلتون التي عرّفناها في الفصل الأول. وقيمة E المحسوبة من المعادلة (8.4.24) هي طاقة النظام. والطاقة يمكن أن تكون لها قيم منفصلة أو متصلة بحسب جهدي التفاعل $\{A^j, U_{\mathrm{I}}\}$ في المعادلة (8.4.26). ومن أمثلة الأنظمة الفيزيائية التي لها قيم طاقة منفصلة تشمل المذبذب التوافقي وذرّة الهيدروجين.

مثال 2.4.8: المذبذب التوافقي في النظرية الكمية

إن طاقة المذبذب التوافقي الذي له ثابت زنبرك k_{HO} في بُعد فراغي واحد وطاقة جهد $U_{\mathrm{I}} = K_{\mathrm{HO}}\, x^1 = K_{\mathrm{HO}} x$ هي:

$$E_n=\left(n+\frac{1}{2}\right)\hbar\omega_{\mathrm{HO}}, \quad \omega_{\mathrm{HO}}=\sqrt{\frac{k_{\mathrm{HO}}}{m}}, \quad n=0,1,2,3,\ldots \qquad (8.4.27)$$

القيم المسموحة للطاقة يتم حسابها بالعدد الصحيح n، الذي يُسمّى العدد الكمي. وكل قيمة للعدد الكمي توافق حالة كمية. ومجموعة قيم الطاقة المنفصلة تعطي طيف طاقي منفصل. والفرق في الطاقة بين حالتين لمذبذبين توافقيين هو:

$$E_{n+1} - E_n = \left(n+1+\frac{1}{2}\right)\hbar\omega_{\text{HO}} - \left(n+\frac{1}{2}\right)\hbar\omega_{\text{HO}} = \hbar\omega_{\text{HO}} \qquad (8.4.28)$$

الفرق في الطاقة في المعادلة (8.4.28) هو كمٌّ من الطاقة. والتردد ω_{Ho} في المعادلة (8.4.28) هو التردد الزاوي بوحدة الراديان/ثانية (radian/sec or rad/s). والتردد الزاوي ω بوحدة الراديان لكل ثانية مرتبط بالتردد f بوحدة الهيرتز (Hertz) بالعلاقة التالية:

$$\omega = 2\pi f \qquad (8.4.29)$$

الطاقة الكمية للمذبذب التوافقي E_{HO} يمكن التعبير عنها بدلالة التردد والتردد الزاوي بالعلاقة التالية:

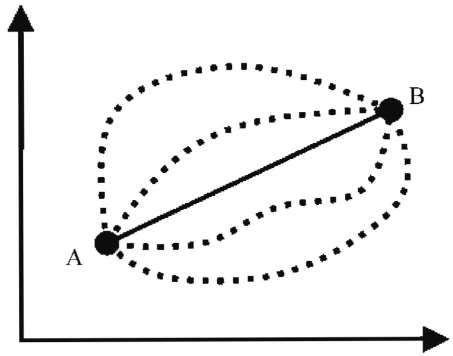
$$E_{\text{HO}} = \hbar\omega_{\text{HO}} = \hbar(2\pi f_{\text{HO}}) = hf_{\text{HO}} \qquad (8.4.30)$$

يمكن للمذبذب التوافقي أن يغير من حالات طاقته فقط بامتصاص أو إطلاق (إشعاع) كمٌّ من الطاقة $\hbar\omega_{\text{Ho}}$. لاحظ أن الحالة الأرضية للمذبذب التوافقي، أي الحالة ذات العدد الكمي $n=0$، طاقتها هي $E_o = \hbar\,\omega_{\text{Ho}}/2$. ووجود طاقة لا صفرية للحالة الأرضية للمذبذب التوافقي هو تأثير ميكانيكي كمي صرف.

5.8 شكلية تكامل المسار

قدّم الفيزيائي الأميركي ريتشارد فينمان (Richard Feynman) شكلية تكامل المسار لميكانيكا الكم في عام 1942 في أطروحته لرسالة الدكتوراه التي تقدم بها إلى جامعة برينستون [فينمان، 1942]. ربط فينمان حركة الجُسَيم بسعة الاحتمال. وأحد الأمثلة على سعة الاحتمال هي الدالة ψ التي قدّمناها في المعادلة (8.4.11). افترض فينمان أن احتمال اتباع الجُسَيم مساراً بين نقطتين في منطقة في الفراغ يساوي المربع المطلق لمجموع سعة الاحتمال الذي يمثل جميع المسارات الممكنة في المنطقة. وتساهم المسارات بالتساوي

في المقدار، لكن طور مساهمتها هو الفعل الكلاسيكي الذي قدّمناه في القسم 5.1. يوضح الشكل (1.8) بعض المسارات، بما في ذلك المسار الكلاسيكي المرسوم بخط غير متقطع، التي تصل بين النقطتين A وB على رسم بياني مرسوم بين المكان والزمن. وتصوُّر فينمان لتكامل المسار موضح في المثال التالي. ويقدم هذا المثال وجهة نظر أخرى للعلاقة بين الفيزياء الكلاسيكية وفيزياء الكم.



الشكل (1.8): مسارات فينمان

مثال 1.5.8: تحليل تكامل المسار لجُسَيم حر

لنفترض حركة جُسَيم حر في بُعد فراغي واحد. يتم حساب سعة الاحتمال ϕ عند نقطة في الفراغ x_{i+1} وزمن $t+\varepsilon$ لفترة متناهية في الصغر ε من سعة الاحتمال عند xi و t باستخدام العلاقة التالية:

$$\phi(x_{i+1}, t+\varepsilon) = \frac{1}{A}\int_{-\infty}^{\infty} e^{iS(x_i)/\hbar}\phi(x_i, t)\,dx_i \qquad (8.5.1)$$

حيث $dx_i = x_{i+1}-x_i$ و A ثابت العيارية (Normalization

constant). والفعل S يتم التعبير عنه بدلالة دالة لاغرانج L (Lagrangian) بالعلاقة التالية:

$$S(x) = \int L(\dot{x})\, dt \tag{8.5.2}$$

ودالة لاغرانج للجُسَيم الحر اللانسبي ذو الكتلة m هي:

$$L(\dot{x}) = \frac{m}{2}\dot{x}^2 = \frac{m}{2}\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 \tag{8.5.3}$$

نستخدم قاعدة شبه المنحرف (Trapezoidal Rule) لتقريب التكامل في المعادلة (8.5.1). والنتيجة هي النحو التالي:

$$S(x_i) = \varepsilon \frac{m}{2}\left(\frac{x_{i+1} - x_i}{\varepsilon}\right)^2 \tag{8.5.4}$$

ويتيح لنا تعريف المتغيرين:

$$\delta_x \equiv x_{i+1} - x_i, \qquad x \equiv x_{i+1} \tag{8.5.5}$$

كتابة المعادلة (8.5.1) على الشكل التالي:

$$\phi(x, t+\varepsilon) = \frac{1}{A}\int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(i\frac{m}{2\hbar\varepsilon}\delta_x^2\right)\phi(x - \delta_x, t)\, d\delta_x \tag{8.5.6}$$

بإجراء مفكوك سلسلة تايلور (Taylor Series Expansion) لسعات الاحتمال إلى الدرجة الأولي في ε والدرجة الثانية في δ_x نحصل على:

$$\phi(x,t) + \varepsilon\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{1}{A}\int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(i\frac{m}{2\hbar\varepsilon}\delta_x^2\right)\left(\phi(x,t) - \delta_x\frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\delta_x^2}{2}\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2}\right)d\delta_x \tag{8.5.7}$$

ويمكن حساب التكامل للطرف الأيمن من المعادلة (8.5.7) باستخدام التكاملات التالية:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-a^2 z^2\right) dz = \frac{\sqrt{\pi}}{a}$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} z \exp\left(-a^2 z^2\right) dz = 0 \qquad (8.5.8)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} z^2 \exp\left(-a^2 z^2\right) dz = \frac{\sqrt{\pi}}{2a^3}$$

فتصبح المعادلة (8.5.7) كالتالي:

$$\phi(x,t) + \varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{1}{A}\frac{\sqrt{\pi}}{a}\phi(x,t) + \frac{1}{4A}\frac{\sqrt{\pi}}{a^3}\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2}, \quad a = \sqrt{\frac{-im}{2\hbar\varepsilon}} \qquad (8.5.9)$$

للتأكد من استمرارية سعات الاحتمال عندما $\varepsilon \to 0$، نجعل $A = \sqrt{\pi/a}$ بحيث تصبح المعادلة (8.5.9) كالتالي:

$$\phi(x,t) + \varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial t} = \phi(x,t) + \frac{1}{4a^2}\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = \phi(x,t) - \frac{\hbar\varepsilon}{2im}\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \qquad (8.5.10)$$

المعادلة (8.5.10) صالحة لجميع قيم ε عندما تتساوى معاملات الحدود ε، أي عندما:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = -\frac{\hbar}{2im}\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \qquad (8.5.11)$$

بضرب المعادلة (8.5.11) في $i\hbar$ نحصل على :

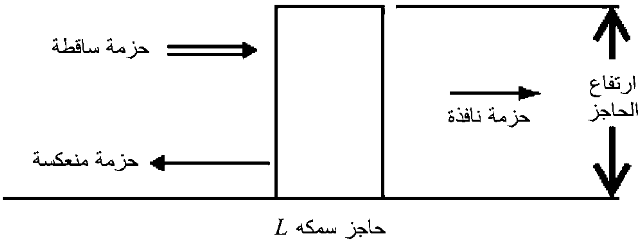
$$i\hbar\frac{\partial \phi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m}\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \qquad (8.5.12)$$

هذه المعادلة (8.5.12) هي معادلة شرودنجر للجُسَيم الحر.

6.8 الاختراق: ظاهرة ميكانيكية كمية

إن ظاهرة الاختراق (Tunneling) هي إحدى التنبؤات الرائعة والفريدة للنظرية الكمية[3]. تخيّل رمي كرة تنس على جدار. عندما تصطدم الكرة بالجدار فإنها ترتد. وفقاً للنظرية الكمية هناك احتمال،

وإن كان صغيراً جداً، بأن الكرة في الواقع ستخترق الجدار. ولجسم بحجم كرة التنس، فإن احتمال أن تخترق الكرة الجدار صغير جداً لدرجة أننا لا نتوقع أن يحدث. ولكن إذا افترضنا جسماً أصغر بكثير من كرة التنس، مثل الذرّة أو الجُزَيء، يصطدم بحاجز أنحف بكثير من الجدار، مثل الغشاء الرقيق لخلية حية، فإن احتمال أن تخترق الذرّة أو الجُزَيء غشاء الخلية يصبح كبيراً بما يكفي لنا لنتوقع حدوث الحدث ويكون مشاهَداً. هذه الظاهرة للاختراق مرسومة في الشكل (2.8).



الشكل (2.8): ظاهرة الاختراق الميكانيكي الكمي

يبيّن الشكل (2.8) حزمة من الجُسَيمات تسقط من الجهة اليسرى للشكل متجهة نحو الحاجز المستطيل. وتم استخدام حزمة، أو مجموعة، من الجُسَيمات لتبسيط تفسيرنا لظاهرة الاختراق. هذه الجُسَيمات يمكن أن تكون كرات تنس أو ذرّات. من وجهة النظر العملية، يجب استخدام جُسَيمات بحجم الذرّات أو أصغر إذا كنا نأمل مشاهدة ظاهرة الاختراق.

إن الحاجز المبيّن في الشكل (2.8) هو حاجز طاقة الجهد. على سبيل المثال، يمكن اعتبار الجدار الطبيعي بأنه حاجز طاقة الجهد. لنتخيّل رصاصة أطلقت على الجدار. يمكن للرصاصة أن تخترق الجدار إذا كانت طاقة حركتها كبيرة بما يكفي لدفع جُزَيئات الجدار

خارج الجدار. إن الروابط الجزيئية التي تعمل على تماسك جُزَيْئات الجدار مع بعضها تشكّل حاجز طاقة الجهد. كمثال آخر، يمكن للإلكترون الذري أن يكون محصوراً في بئر الجهد الإلكتروستاتيكي للنواة ما لم يكن للإلكترون طاقة حركة تكفي لأن يفلت من البئر. إن ارتفاع الحاجز في الشكل (2.8) يمثّل مقدار حاجز طاقة الجهد، وارتفاع السهم للحزمة الساقطة يمثل مقدار طاقة الحركة للحزمة. إذا كان السهم الذي يمثل طاقة الحركة لحزمة الجُسَيمات الساقطة فوق قمة حاجز طاقة الجهد، فإن الحاجز لن يمنع حزمة الجُسَيمات الساقطة من المرور نحو الجهة اليمنى في الشكل. من ناحية أخرى، إذا كان السهم أسفل قمة الحاجز، فإن هناك شيئين يمكن حدوثهما.

في الفيزياء الكلاسيكية، تنعكس جميع الجُسَيمات عند الحاجز والموضع الفراغي للجهة اليسرى من الحاجز تسمى نقطة التحول (Turning Point). وفي فيزياء الكم، عندما تصطدم حزمة الجُسَيمات الساقطة بالحاجز، فإن بعض الجُسَيمات تنعكس بينما بقيتها تنفذ، أو تخترق، من خلال الحاجز إلى المنطقة الممنوعة كلاسيكياً. وسيعتمد العدد الدقيق للجُسَيمات المنعكسة والنافذة على عوامل مثل سماكة الحاجز، وارتفاع الحاجز، وسرعة الحزمة الساقطة. كما يمكننا حساب الاحتمال لكل من الجُسَيمات المنعكسة والنافذة.

إن احتمال جُسَيم كتلته m وطاقته E بأن ينفذ من خلال حاجز عرضه L وطاقة جهده U هو:

$$P_T = \left\{ 1 + \frac{1}{4}\left[\frac{U^2}{E(U-E)}\right]\sinh^2\left(\frac{\sqrt{2m(U-E)}}{\hbar}L\right)\right\}^{-1} \qquad (8.6.1)$$

واحتمال أن ينعكس الجُسَيم هو:

$$P_R = 1 - P_T = 1 - \left\{ 1 + \frac{1}{4}\left[\frac{U^2}{E(U-E)}\right]\sinh^2\left(\frac{\sqrt{2m(U-E)}}{\hbar}L\right)\right\}^{-1} \qquad (8.6.2)$$

لأن بقاء الاحتمالية يتطلب أن يكون.

وإذا استخدمنا حزمة من الجُسَيمات، فإن الجزء الذي نفذ منها يساوي احتمال النفاذ. وبالمثل، الجزء الذي انعكس منها يساوي احتمال الانعكاس. من ناحية أخرى ، يمكننا استخدام جُسَيم واحد وتكرار التجربة عدة مرات. وفي هذه الحالة، الجزء من التجارب التي نفذ فيها الجُسَيم يساوي احتمال النفاذ، والجزء من التجارب التي انعكس فيها الجُسَيم يساوي احتمال الانعكاس. وأيٌّ من التصورين، أي استخدام حزمة من الجُسَيمات أو جُسَيم عدة مرات، سيوضح بأن جزءاً من الحزمة الساقطة سينعكس مرتداً ومبتعداً عن الحاجز والجزء الآخر من الحزمة الساقطة سينفذ من خلال الحاجز. وهذه النتائج هي نتيجة منطقية لميكانيكا الكم.

إن ظاهرة الاختراق تضفي دعماً تجريبياً على النظرية الكمية. فقد استخدمت هذه الظاهرة في تطوير الترانزستورات، وكأداة ـ مثل ميكروسكوب النفق الماسح ـ لدراسة أسطح التركيبات على المستوى الذري. ومن وجهة نظر الطاقة، تؤدي ظاهرة الاختراق دوراً في التفاعلات النووية.

7.8 تفسير النظرية الكمية

إن الكمية الأكثر أساسية للحساب النظري الكمي هي سعة الاحتمال أو متجه الحالة. وقد تم اقتراح العديد من التفسيرات[4] لمتجه الحالة، إلا أن اثنين منها بشكل خاص كان لهما أثر تاريخي كبير. وهذان هما التفسير الإحصائي وتفسير كوبنهاغن. وسوف ننظر في كلا التفسيرين، ولكن يجب ملاحظة أن قبول أحد التفسيرين عوضاً عن الآخر ليس ضرورياً للتطبيق العملي المفيد لنظرية الكم.

إن أيّ نظرية يمكن وصف خصائصها بمجموع الشكلية

وتفسيرها. ويمكن للعلماء استخدام شكلية نظرية الكم (طريقة الحساب) من دون الفهم الكامل لما تعنيه كل سمة للشكلية. وبمعنى آخر، تفسير الشكلية المحددة تماماً رياضياً لا ينبغي أن يكون صحيحاً بالكامل قبل أن نحصل على معلومات نافعة منها. وقد أجريت محاولات للتوضيح بأن الاختلاف في التفسير يمكن أن يؤدي إلى اختلافات حسابية يمكن فحصها تجريبياً. وإحدى تلك المحاولات، التي تم افتراضها أولاً من قِبَل الفيزيائي النمساوي إروين شرودنجر، توضح الفرق بين التفسير الإحصائي وتفسير كوبنهاغن.

وضع شرودنجر التصور التالي: لنفترض أننا نضع قطة حية في غرفة مغلقة. بالإضافة إلى القطة، نضع أيضاً قارورة من الزرنيخ في الغرفة، وذرّة مشعة، وجهازاً يكسر القارورة عندما تضمحل الذرّة المشعة. اضمحلال الذرّة هو الحدوث المحتمل؛ نعلم بأنه سيحدث، ولكن لا نعلم متى. وإذ كنا ننظر في الغرفة بشكل دوري، لا نعلم مسبقاً ما إذا كنا سنجد قطة حية أو قطة ميتة. ولكننا نستطيع، من حيث المبدأ، تكوين متجه حالة S (حية) يصف الغرفة بقطة حية وذرّة غير مضمحلة. ونستطيع أيضاً، من حيث المبدأ، تكوين متجه حالة S (ميتة) يصف الغرفة بقطة ميتة وذرّة مضمحلة. ومتجه الحالة للنظام ككل S (النظام) هو مجموع متجهي الحالة S (حية) وS (ميتة). فكيف يجب أن نفسر متجه الحالة S (النظام)؟ هذا السؤال هو جوهر تناقض قطة شرودنجر.

بالنسبة لمؤيدي تفسير كوبنهاغن، فإن S (النظام) يصف بالكامل كل شيء يمكن أن نعرفه عن قطة شرودنجر. فلو ننظر في الغرفة عندما كان هناك احتمال خمسين في المئة بأن الذرّة قد اضمحلت، فإن متجه الحالة S (النظام) سيحتوي على جزءين متساويين من S

(حية) وS (ميتة). فهل يعني ذلك بأن القطة نصف ميتة ونصف حية؟ يجيب مؤيدو تفسير كوبنهاغن بالنفي. فهم يقولون إن عملية النظر في الغرفة أجبر متجه الحالة S (النظام) إلى أن يكون في إحدى متجهي الحالة S (حية) أو S (ميتة). وهذا يعرف باختزال متجه الحالة وهي آلية يستخدمها مؤيدو كوبنهاغن لتجنب الإجابة غير المعقولة على تناقض قطة شرودنجر.

ومؤيدو التفسير الإحصائي لهم نظرة مختلفة. فهم يتصورون عدداً كبيراً جداً من القطط في الطبقة المبتكرة بواسطة شرودنجر. وينطبق متجه الحالة S (النظام) على هذا العدد الكبير جداً من الأنظمة. وعدد الأنظمة يجب أن يكون كبيراً بما فيه الكفاية ليوفر معلومات إحصائية ذات معنى . فإذا نظرنا في جميع الغرف عندما كان هناك احتمال خمسين في المئة بأن الذرات في كل غرفة قد اضمحلت، فإننا سنجد أن نصف الغرف تحتوي على قطط ميتة والنصف الأخرى تحتوي على قطط حية. في التفسير الإحصائي، متجه الحالة S (النظام) لا ينطبق على نظام واحد، بل على عدد كبير جداً من الأنظمة المُعدّة المتشابهة تعرف بالطاقم المنسجم (ensemble). ومتجه الحالة S (النظام) يصنع تعبيراً إحصائياً عن الطاقم المنسجم من الأنظمة. والتفسير الإحصائي لا يحتاج إلى آلية لاختزال متجه الحالة التي كانت متطلباً في تفسير كوبنهاغن.

إن النظرية الكمية هي نظرية غير محددة بمعنى أن نتيجة أيّ قياس هي غير متوقعة بشكل دقيق؛ ولكن يمكن حساب الاحتمال فقط لمختلف النتائج الممكنة. ومؤسسو النظرية الكمية يعترفون بأن مفهومي الحتمية والسببية (السبب والتأثير) كانا يتغيران من القوانين غير القابلة للجدل التي تصف الطبيعة إلى تقريبات للطبيعة. نيلز بوهر، على سبيل المثال، أدرك بأن السببية قد يكون لها حدود:

الصفة 4.8: كما إن حرية الإرادة هي صنف تجريبي من حياتنا الروحية، فإن السببية يمكن اعتبارها نمطاً للإدراك الذي نحوّل فيه انطباعات إحساسنا إلى طلب. وفي نفس الوقت، على أيّ حال، نحن مهتمون في كلتا الحالتين بالمثاليات التي تكون حدودها الطبيعية مفتوحة للتحقق منها [سامبرسكي، 1975، ص 535].

وفي ما يتعلق بتصادمات الجُسَيم، كتب ماكس بورن:

الصفة 5.8: من وجهة نظر ميكانيكا الكم لا توجد كمية تقوم سببياً بإصلاح تأثير التصادم في حادثة مفردة... أنا نفسي لجأت إلى إنكار الحتمية في العالم الذري [بايس (Pais)، 1982، ص 900].

لقد غيّر ظهور النظرية الكمية نظرتنا للسببية، والحتمية، وطبيعة المادة والطاقة. فالحتمية، التي تبدو الأساس المتين للفيزياء الكلاسيكية، قد فشلت. وأخذت مكانها نظرية مستندة على الاحتمال، وهي نظرية تفتقر إلى تقدير أيّ نظام فردي.

ميكانيكا الكم والنظرية النسبية كانتا اثنتين من الإنجازات العظيمة للفيزياء في النصف الأول من القرن العشرين. ميكانيكا الكم فسرت سلوك الأنظمة دون المجهرية، والنسبية الخاصة وصفت سلوك الأجسام المتحركة بسرعات قريبة من سرعة الضوء. وتم توحيد النظريتين أولاً في العشرينيات من القرن الماضي لتشكّلا نظرية تعرف الآن باسم نظرية الكم النسبية. سنناقش هذه النظرية في الفصل القادم.

8.8 الفولتضوئية

تم تصميم تقنيات الكهرباء الشمسية لتحويل الضوء القادم من الشمس مباشرة إلى طاقة كهربائية[1]. إن بعض العمليات الهامة جداً

للكهرباء الشمسية هي الظاهرة الكهروضوئية (Photoelectric Effect) والفولتضوئية (Photovoltaics). لفهم هاتين العمليتين، يجب أن نفهم كيف يمكن لضوء الشمس أن يوفر الطاقة اللازمة لجعل الإلكترونات تتحرك في بعض أنواع المواد. وبشكل أساسي، يجب أن نفهم كيف تتحرك الإلكترونات في المواد. نبدأ هذا القسم بمناقشة لنموذج غاز الإلكترون الحر للموصلية. وهذا يعطينا الخلفية اللازمة لتقديم مناقشة حديثة للظاهرة الكهروضوئية والفولتضوئية.

نظرية الإلكترون الحر للموصلية

قدّم باول درودي (Paul Drude) نموذجاً كلاسيكياً للموصلية في الفلزّات في عام 1900 [بيرنشتاين وآخرون، ص 394]. ونموذج درودي هو أساس النظرية الحديثة لتوصيل الإلكترونات في الفلزات. وهذا النموذج الكلاسيكي يعامل الفلزّات كمواد تحتوي على شحنات موجبة ساكنة وإلكترونات هي إلكترونات التكافؤ غير المرتبطة بإحكام بنواة الذرّة. وإلكترونات التكافؤ هي الإلكترونات الخارجية، أو إلكترونات مستويات الطاقة العليا للعناصر الموجودة في المجموعة الرئيسية في الجدول الدوري. وإلكترونات التكافؤ يمكن أن تتحرك مثل الغاز الحر خلال الفلزّ. والتفاعلات بين إلكترونات التكافؤ والجُسَيمات الأخرى مهملة بين التصادمات. وتتغيّر سرعة الإلكترون لحظياً عندما يعاني الإلكترون تصادماً. فإذا رمزنا τ لمتوسط الزمن بين التصادمات، فإن احتمال أن يشارك الإلكترون في تصادم خلال الفترة الزمنية dt هو dt/τ. وإذا كانت المادة خاضعة لتغير في درجة الحرارة، فإن الإلكترونات تصل إلى حالة اتزان حراري بالمشاركة في التصادمات.

النموذج الميكانيكي الكمي لموصلية الفلزّات يتبنّى عدداً من

أفكار النموذج الكلاسيكي، إلا أنه يعبّر عنها في إطار ميكانيكي كميّ لانسبي. نبدأ بمعادلة شرودنجر الثلاثية البعد للجُسَيم الحر، أي:

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2\psi(x,y,z)=E\psi(x,y,z) \qquad (8.8.1)$$

حيث m كتلة إلكترون التكافؤ، وE طاقته، و $\hbar$ ثابت بلانك مقسوماً على 2π، و$\psi(x,y,z)$ الدالة الموجية في الإحداثيات الديكارتية (الكارتيزية). نتصور فلزاً بمجموعة من الذرات أو الجُزَيئات التي تشغل أركان مكعبات شبيكة مكعبة طول ضلعها L. سيشغل إلكترون تكافؤ كل ركن من أركان الشبيكة، ونفترض أن المعادلة (8.8.1) تصف سلوك إلكترون التكافؤ. والدالة الموجية التي تصف هذا النظام المتناسق يجب أن تحقق الشرط الحدّي التالي:

$$\psi(x,y,z)=\psi(x+L,y,z)=\psi(x,y+L,z)=\psi(x,y,z+L) \qquad (8.8.2)$$

الشرط الحدّي في المعادلة (8-8-2) يُسمّى شرطاً حدّياً دورياً (Periodic Boundary Condition). ويمثل الشرط الحدّي الدوري شبيكة مكعبة في الفراغ k، أي فراغ ثلاثي البعد بالإحداثيات $\{K_x, K_y, K_z\}$. والمسافة بين النقاط في الفراغ k هي $/L$، ويمكن كتابة المتجه في الفراغ k على الصورة التالية:

$$\vec{k}_F=\frac{\pi}{L}(n_x,n_y,n_z) \qquad (8.8.3)$$

للأعداد الصحيحة $n_x = 0,1,2,...;\ n_y = 0,1,2,...;\ n_z = 0,12,...$ ويُسمّى المتجه K_F بمتجه فيرمي (Fermi Vector). أحد حلول المعادلة (8.8.1) التي تحقق الشرط الحدّي الدوري في المعادلة (8.8.2) هو:

$$\psi(x,y,z)\sim\sin\left(\frac{\pi}{L}n_x x\right)\sin\left(\frac{\pi}{L}n_y y\right)\sin\left(\frac{\pi}{L}n_z z\right) \qquad (8.8.4)$$

وهي خاضعة للشرط التالي:

$$\frac{2mE}{\hbar^2}=\frac{\pi^2}{L^2}\left(n_x^2+n_y^2+n_z^2\right)=\vec{k}_F\cdot\vec{k}_F=k_F^2 \qquad (8.8.5)$$

حيث الأعداد الصحيحة $n_x = 0, 1, 2,...$ ؛ $n_y = 0, 1, 2,...$ ؛ $n_z = 0, 1, 2,...$. تعتبر الآن أعداداً كمية.

إذا علمنا بأن عدد الإلكترونات في الحالة الأرضية (أو الحالة غير المثارة) لفلز هو عدد كبير، فإن المنطقة المشغولة من الفراغ k يمكن تصورها ككرة نصف قطرها $K_F = \|K_F\|$ حيث kF هو مقدار متجه فيرمي. تسمى هذه الكرة بكرة فيرمي (Fermi Sphere) وتحتوي على جميع الحالات الكمية المشغولة ذات الإلكترون الواحد. وبما أن كل عدد كمي $\{n_x, n_y, n_z\}$ هو صفر أو موجب، فإننا يجب أن نأخذ ثُمن واحد فقط من الكرة. يُسمّى سطح كرة فيرمي بسطح فيرمي (Fermi Surface). وسطح فيرمي يفصل المستويات المشغولة عن المستويات غير المشغولة.

إن عدد الإلكترونات في كرة فيرمي هو:

$$N=2\frac{k_F^3}{6\pi^2}V=\frac{k_F^3}{3\pi^2}V \qquad (8.8.6)$$

حيث الحجم $V = L^3$. وتحتوي المعادلة (8.8.6) على المعامل 2 لأن الإلكترونات تخضع لقاعدة باولي للاستثناء (Pauli Exclusion Principle). وقاعدة باولي للاستثناء تنص بأنه لا يمكن لجُسَيمين يتعذر التمييز بينهما أن يشغلا نفس الحالة الكمية، وتنطبق على الفيرميونات مثل الإلكترونات، والبروتونات، والنيوترونات. المعامل 2 يحدد بأن أيّ إلكترونين لهما نفس الطاقة سيكونان في حالتين كميتين مختلفتين لأنهما سيمتلكان غزْلاً نحو الأعلى أو غزْلاً نحو الأسفل. وكثافة الإلكترون في كرة فيرمي يمكن إيجادها من المعادلة (8.8.6) لتكون على النحو التالي:

$$n=\frac{N}{V}=\frac{k_F^3}{3\pi^2} \qquad (8.8.7)$$

ومقدار كمية التحرك للإلكترون عند سطح فيرمي هو كمية تحرك فيرمي التالي:

$$p_{\mathrm{F}} = \hbar k_{\mathrm{F}} \tag{8.8.8}$$

وسرعة فيرمي المقابلة لديها المقدار التالي:

$$v_{\mathrm{F}} = \frac{p_{\mathrm{F}}}{m} = \frac{\hbar k_{\mathrm{F}}}{m} \tag{8.8.9}$$

وطاقة حركة الإلكترون هي طاقة فيرمي التالية:

$$E_{\mathrm{F}} = \frac{p_{\mathrm{F}}^2}{2m} = \frac{\hbar^2 k_{\mathrm{F}}^2}{2m} = \frac{1}{2} m v_{\mathrm{F}}^2 \tag{8.8.10}$$

واحتمال أن يكون الإلكترون في مستوى طاقته E يُعطى بدالة التوزيع التالية:

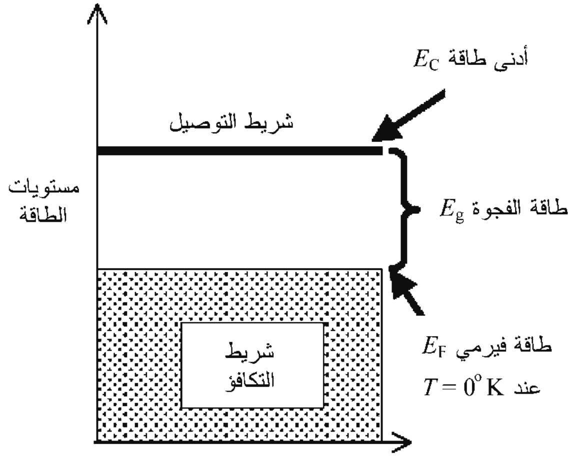
$$f(E) = \frac{1}{\exp[(E - E_{\mathrm{F}})/k_{\mathrm{B}}T] + 1} \tag{8.8.11}$$

حيث k_B ثابت بولتزمان وT درجة حرارة المادة. تسمى المعادلة (8.8.11) بدالة توزيع فيرمي - ديراك (Fermi-Dirac Distribution function). ودالة التوزيع تقدّم معنى فيزيائياً لطاقة فيرمي وهو: أن الإلكترون له احتمال 50 في المئة بأن تكون طاقته مساوية لطاقة فيرمي $E = E_F$ عند أيّ درجة حرارة. ويمكن استخدام طاقة فيرمي لتعريف درجة حرارة فيرمي كالتالي:

$$T_{\mathrm{F}} = \frac{E_{\mathrm{F}}}{k_{\mathrm{B}}} \tag{8.8.12}$$

وتؤدي طاقة فيرمي دوراً هاماً في تحديد الطاقة التي يحتاجها الإلكترون للبدء بالحركة[5]. يوضح الشكل (3.8) مستويات الطاقة المشتركة في التوصيل الكهربي في الفلز عند درجة حرارة 0° K. وتمثل طاقة فيرمي E_F أقصى طاقة للإلكترون في المادة غير المتفاعلة. جميع مستويات الطاقة الأقل من طاقة فيرمي مملوءة

بالإلكترونات، وجميع مستويات الطاقة الأعلى من طاقة فيرمي فارغة. الشريط السفلي المملوء بالإلكترونات هو شريط التكافؤ. والشريط العلوي لمستويات الطاقة هو شريط التوصيل. إذا كان الفلز عند درجة حرارة $T > o^{o}k$، فإن عدداً قليلاً من الإلكترونات سيكون لديه الطاقة الحرارية الكافية لتجاوز حاجز طاقة فيرمي. ويعطى توزيع الإلكترونيات بدالة توزيع فيرمي ـ ديراك.



الشكل (3.8): مستويات الطاقة في الفلز

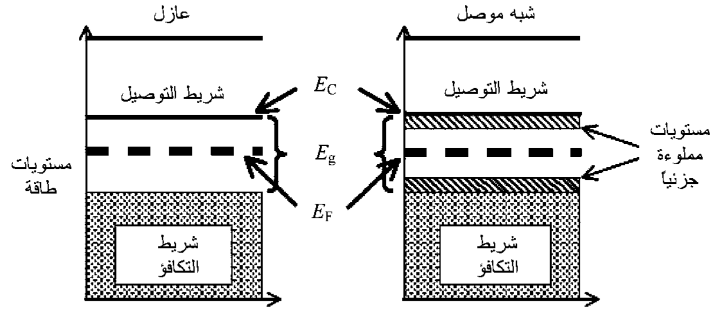
إن طاقة التوصيل E_C هي مستوى الطاقة الأقل التي يجب على الإلكترون بلوغها قبل أن يتمكن من الحركة خلال المادة. والفرق في الطاقة بين طاقة التوصيل E_C وطاقة فيرمي E_F في الفلز عند درجة الحرارة 0^o K هي طاقة الفجوة Eg الواقعة بين شريط التكافؤ وشريط التوصيل، أي إن:

$$E_g = E_C - E_F \qquad (8.8.13)$$

وتسمّى طاقة الفجوة E_g أيضاً طاقة شريط الفجوة لأنها الفرق

في الطاقة بين شريط التوصيل بأدنى طاقة توصيل E_C وشريط التكافؤ لمستويات الطاقة. في الفلز عند درجة الحرارة 0 K، أعلى مستوى طاقة في شريط التكافؤ هو طاقة فيرمي EF. ومستويات الطاقة التي طاقاتها أقل من طاقة فيرمي E_F هي مستويات شريط التكافؤ. وهذه هي مستويات الطاقة للإلكترونات المرتبطة. أما مستويات الطاقة التي طاقاتها أعلى من طاقة التوصيل E_C فهي مستويات طاقة الإلكترون الحر في شريط التوصيل. ويمكن للإلكترون أن يتحرك خلال المادة إذا كانت لديه طاقة حركة KE_e كافية ليقفز عبر طاقة الفجوة ويدخل مستويات طاقة التوصيل للمادة.

يمكن استخدام طاقة الفجوة لتصنيف الخصائص الكهربية للمواد. يبيّن الشكل (4.8) مستويات الطاقة في العوازل وأشباه الموصّلات. تقع طاقة فيرمي في المنتصف بين شريط التكافؤ وشريط التوصيل. ولا يوجد للعازل أيّ مستويات طاقة أعلى شريط التكافؤ أو أسفل شريط التوصيل. ويجب إثارة الإلكترونات بطاقة كافية لكي تجتاز طاقة الفجوة.



الشكل (4.8): مستويات الطاقة في العازل وشبه الموصل

إن شبه الموصّل لديه مستويات طاقة مملوءة جزئياً أعلى شريط التكافؤ وأسفل شريط التوصيل. وهذا يخفض كثيراً من الطاقة

المطلوبة لإثارة الإلكترونات إلى شريط التوصيل. وشبه الموصّل المطعم بذرات مانحة، مثل الزرنيخ الذي لديه خمسة إلكترونات تكافؤ، يُسمّى شبه الموصل نوع n- (N-type Semiconductor). وشبه الموصل المطعم بذرات متقبلة، مثل البورون الذي لديه ثلاثة إلكترونات تكافؤ، يُسمّى شبه الموصل نوع (P-type Semiconductor) p-. مستويات الطاقة للذرات المانحة تقع مباشرة أسفل مستويات طاقة شريط التوصيل، ومستويات الطاقة للذرات المتقبلة تقع مباشرة أعلى مستويات طاقة شريط التكافؤ.

إن الموصّلات مثل الفلزات لديها طاقة فجوة E_{gC} صغيرة نسبياً. والعوازل مثل البلاستيك لديها طاقة فجوة E_{gI} كبيرة نسبياً. والمواد شبه الموصّلة لديها طاقة فجوة E_{gS} في المدى بين الموصّلات والعوازل (أي إن $E_{gC} < E_{gS} < E_{gI}$). طاقة الفجوة لعازل تقريباً 10 eV (1.6×10 J)، أما شبه الموصّل فطاقة الفجوة له هي في حدود 1 eV (1.6×10 J). وللمقارنة، متوسط الطاقة الحرارية لإلكترون عند درجة حرارة الغرفة هي حوالي 0.025 eV (0.04×10^{19} J).

الظاهرة الكهروضوئية

رأينا بأن الإلكترون يمكنه أن يتحرك في الفلز عندما تتجاوز طاقة حركته طاقة فيرمي، أي $KE_e > E_F$. وكان معروفاً في أواخر القرن التاسع عشر بأن الإلكترون يمكن انتزاعه من الفلز المعرض لشعاع كهرومغناطيسي، إلا أن تلك الظاهرة اعتمدت على تردد الشعاع. سميت هذه الظاهرة بالظاهرة الكهروضوئية. واستخدم ألبرت إينشتاين مفهوم الطاقة المكممة لتفسير الظاهرة الكهروضوئية في عام 1905، وهي السنة نفسها التي نشر فيها نظريته للنسبية الخاصة.

ولا يمكن انتزاع الإلكترون من الفلز ما لم تكن لدى الإلكترون

الطاقة الكافية للتغلب على دالة الشغل (Work Function) W للفلز. ودالة الشغل هي أقل طاقة مطلوبة لانتزاع الإلكترون من الفلز، وتتراوح عادة بين (3.2x10 J) 2 eV و(12.8x10 J) 8 eV. وتعتمد دالة الشغل على نوع المادة وظروف سطحها. افترض إينشتاين بأن التصادم بين فوتون وإلكترون يمكن أن ينقل طاقة كافية من الفوتون إلى الإلكترون لانتزاع الإلكترون من الفلز. ويجب على الفوتون أن تكون لديه الطاقة الكافية للتغلب على جهد الشغل. إذا اصطدم إلكترون بفوتون تردده ي، فإن الإلكترون سيتم انتزاعه من الفلز بطاقة حركة للإلكترون تحقق المعادلة التالية:

$$\mathrm{KE_e} = h\nu - W > 0 \qquad (8.8.14)$$

حيث $h\nu$ الطاقة الكمية للفوتون، وh ثابت بلانك. والإلكترون الذي تم انتزاعه من الفلز نتيجة اصطدامه بفوتون يُسمّى إلكتروناً ضوئياً (Photoelectron).

الفولتضوئية

يمكن وصف الفولتضوئية بأنها استخدام الضوء لتوليد التيار الكهربائي[6]. ويمكننا صناعة خلية فولتضوئية، أو خلية ضوئية (Photocell) بملامسة اثنين من أشباه الموصّلات مع بعضهما. وأشباه الموصّلات في الخلية الضوئية هي مواد ذات حالة صلبة تكون فيها الذرات مرتبة على شكل تركيب شبيكي. عندما يسقط ضوء الشمس على الخلية الضوئية، فإنه يمكنه انتزاع إلكترون التكافؤ من الذرّة التي في الشبيكة تاركاً وراءه أيوناً موجباً. وهذا الأيون الموجب يُسمّى فجوة (Hole) في شبيكة الخلية. ويمكن لإلكترون من ذرّة متعادلة مجاورة الانتقال من الذرّة المتعادلة إلى الفجوة الموجبة الشحنة. تصبح الذرّة الأصلية المتعادلة فجوة عندما ينتقل الإلكترون منها،

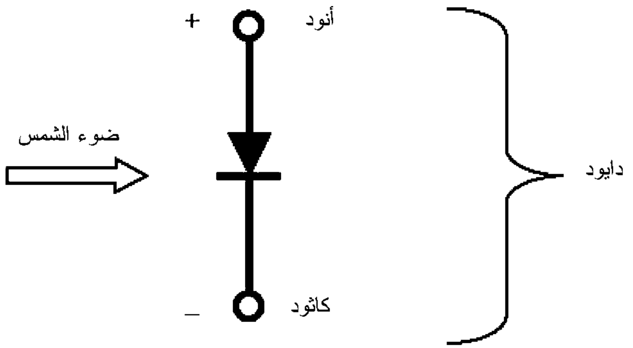
وتصبح الفجوة الأصلية ذرّة متعادلة عندما يقبل الأيون الموجب الشحنة الإلكترون المنتقل إليه. تيار الإلكترونات المتحرك من فجوة إلى أخرى يمكن اعتباره تيار الفجوات المتحرك في الاتجاه المعاكس لتيار الإلكترونات.

الخلية الضوئية هي وصلة ثنائية أو دايود (Diode). والدايود يمكن أن يوصل التيار في اتجاه واحد ولكن ليس في الاتجاه المضاد. المادة شبه الموصلة التي تستقبل إلكترونات التكافؤ وتستبقي الفجوات الموجبة الشحنة تسمى شبه موصل نوع-p. وهي الأنود الموجب الشحنة المبيّن في الشكل (5.8). والمادة شبه الموصلة التي تستقبل إلكترونات التكافؤ وتصبح سالبة الشحنة تسمى شبه موصل نوع-n. وهي الكاثود السالب الشحنة المبيّن في الشكل (5.8).

ويمكن انتزاع الإلكترونات بواسطة الظاهرة الكهروضوئية عندما يسقط ضوء الشمس على شبه الموصل نوع -p. سيتدفق تيار كهربائي من شبه الموصل نوع -p إلى شبه الموصل نوع-n عندما يكون للإلكترونات طاقة كافية للقفز عبر طاقة الفجوة، والدخول إلى شريط التوصيل، وعبور الوصلة p-n. والوصلة p-n هي الفاصل بين شبه الموصل نوع-p وشبه الموصل نوع-n.

يتفاعل ضوء الشمس مع الإلكترونات في الخلية الضوئية ويُنتج أزواج الإلكترون ـ الفجوة. ويجب على ضوء الشمس أن ينقل الطاقة الكافية إلى إلكترون التكافؤ حتى يتمكن الإلكترون من القفز عبر طاقة الفجوة. وإذا كان تردد الضوء لا يوفر الطاقة الكافية لإثارة الإلكترون للقفز، فإن الضوء سيكون غير فعال. من جهة أخرى ، إذا كان تردد الضوء كبيراً، فإن الإلكترون سيأخذ الطاقة التي تكفيه لعمل القفزة الكمية عبر طاقة الفجوة وبقية الطاقة ستولد حرارة. معظم الفوتونات في الضوء لديها طاقة بين 1 eV (1.6×10^{-19} J) و 3 eV (4.8×10^{-19} J)

[سيرواي وآخرون، 1997 (Serway, et al.)، ص 471]. وطاقة الفجوة التي تزيد من تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية هي تقريباً $1.5\ eV\ (2.4x10^{-19}\ J)$.



الشكل (5.8): الخلية الفولتضوئية

إن الخلايا الضوئية ليست مصادر للطاقة كما إنها لا تخزن الطاقة. الخلايا الضوئية تقوم بتحويل ضوء الشمس إلى طاقة كهربائية. عند عدم وجود ضوء الشمس، فإن الخلايا الضوئية تتوقف عن إنتاج الكهرباء. وإذا استخدمت الخلية الضوئية في إنتاج الكهرباء، يتطلب أيضاً نظاماً إضافياً لتوفير الطاقة عندما يكون الضوء غير متوفر. هذا النظام الإضافي قد يكون نظام تخزين للطاقة يتم شحنه بواسطة ضوء الشمس المتحوّل إلى طاقة كهربائية وخزنه بعد ذلك، أو قد يكون مزوِّداً إضافياً للطاقة يتم توفيره بواسطة مصدر آخر.

تعليقات ختامية

1- المصادر عن الفيزياء الحديثة تتضمن لوري (Lawrie) [1990]، وسيرواي وآخرون [1997]، وبيرنشتاين وآخرون [2000].

2- المصادر عن الصياغة القياسية للنظرية الكمية تتضمن بيبلس (Peebles) [1992]، ووايـنبـرغ (Weinberg) [1995]، وسيـرواي وآخرون [1997]، وبيرنشتاين وآخرون [2000].

3- الاختراق تم مناقشته في الكتب الدراسية الاعتيادية لميكانيكا الكم، مثل بيبلس [1992]، وسيرواي وآخرون [1997]، وبيرنشتاين وآخرون [2000]. ويقدّم ميرزباخر (Merzbacher) [2002] تاريخاً عن الأيام الأولى للاختراق الكمي.

4- يوجد كم هائل من المؤلفات العلمية حول تفسير ميكانيكا الكم. بعض المراجع المفيدة تتضمن دابرو (D'Abro) [1951]، وبالنتاين (Ballentine) [1970]، وسامبرسكي [1975]، ونيوتن [1980]، وبيل (Bell) [1987]، وبوم وهايلي (Bohm and Hiley) [1993]، وفانشي [1993]، وأومنس (Omnes) [1994]، وويك (Wick) [1995]، وغرينشتاين وزاجونك (Greenstein and Zajonc) [1997]، وتيجمارك ويلر (Tegmark and Wheeler) [2001].

5- انظر سيرواي وآخرون [1997، الفصل 11] للمزيد من التفاصيل حول طاقة فيرمي والتوصيل الكهربي في المواد.

6- المراجع الأساسية المستخدمة للطاقة الشمسية هي سورينسن (Sϕrensen) [2000]، وجوسوامي وآخرون (Goswami, et al.) [2000]، وبيرنشتاين وآخرون [2000]، وسيرواي وآخرون [1997].

تمارين

1.8 أوجد عامل الطور $\xi(\vec{x},t)$ لجُسَيم حر بمقارنة المعادلة (8.4.19) بالمعادلة (8.4.12).

2.8 اشتق المعادلة (8.5.8) من المعادلة (8.5.7).

3.8 ترتبط كمية التحرك p مع العدد الموجي الميكانيكي الكمي k

بالعلاقة $p = \hbar K = 2\pi\ \hbar/\lambda$ حيث λ الطول الموجي للجُسَيم. احسب العدد الموجي والطول الموجي لفوتون يتحرك بسرعة تساوي $0.001c$. عبّر عن إجابتك بنظام الوحدات SI.

4.8 أ) كرة بولنغ (bowling) كتلتها 5 kg تتدحرج مسافة 30 m في زمن قدره 10 s. ما هي طاقة حركتها؟

ب) افترض أننا عاملنا كرة البولنغ كجُسَيم ميكانيكي كمي حر. ما مقدار العدد الموجي لها؟

ج) احسب الطول الموجي لكرة البولنغ مستخدماً علاقة العدد الموجي $K = 2\pi/\lambda$ حيث λ الطول الموجي.

5.8 افترض أن دالة لاغرانج لجُسَيم لانسبي هي $L(x,\dot{x}) = (1/2)\ m\dot{x}^2\ V(x)$ حيث V طاقة الوضع (الجهد). استخدم تحليل تكامل المسار لفينمان لاشتقاق معادلة شرودنجر للجُسَيم.

6.8 أ) احسب احتمال النفاذ P_T واحتمال الانعكاس P_R للاختراق الميكانيكي الكمي خلال حاجز الجهد المبيّن في الشكل (2.8) مستخدماً قيم المعاملات الفيزيائية U، L، E المعطاة في الجدول أدناه. تم تعريف المعاملات U، L، E في القسم 6.8. افترض أن المعاملات U، L، E قيم محددة لا صفرية ما لم يذكر غير ذلك.

الحالة	المعامل	P_T	P_R
1	$U \to 0$		
2	$U \to \infty$		
3	$L \to 0$		
4	$L \to \infty$		
5	$E \to 0$		
6	$E \to \infty$		

ب) أيّ حالة (أو حالات) توافق اختراقاً خلال حاجز غير منفذ؟

ج) أيّ حالة (أو حالات) توافق سقوط حزمة بكمية تحرك مهملة؟

7.8 اشتق المعادلة (8.8.5) من المعادلات (8.8.1) إلى (8.8.3).

8.8 أ) ارسم بيانياً لتوزيع فيرمي ـ ديراك كدالة في الطاقة لفلز عند درجة حرارة الغرفة ($T=20$ °C). افترض أن طاقة فيرمي هي 1 eV وخذ مدى الطاقة ليكون $0eV<E<2eV$. الطاقة على المحور الأفقي للرسم يجب أن يكون بوحدات eV، ومدى القياس للمحور الرأسي يجب أن يكون من 0 إلى 1.

ب) ما هي قيمة الطاقة (بوحدة eV) المطابقة للقيمة 0.5 لتوزيع فيرمي ـ ديراك؟

ج) احسب الفترة الطاقية (بوحدة eV) بين قيم توزيع فيرمي ـ ديراك 0.98 و0.02؟

9.8 أ) دالة الشغل لفلز هي تقريباً 4 eV. ما هو أقل تردد مطلوب للضوء لانتزاع إلكترون من الفلز بواسطة الظاهرة الكهروضوئية؟

ب) ما هو الطول الموجي المقابل (بالمتر m)؟

10.8 أ) افترض أن لدينا كثافة الاحتمال المشترك $p(x,y)=2(x+2y)/3$ صالحة في الفترتين $0\leqslant x\leqslant 1$ و$0\leqslant y\leqslant 1$. احسب التوزيع الاحتمالي الحدّي $p(y)$.

ب) احسب الاحتمال الشرطي $p(x|y) = p(0.3|0.2)$.

11.8 أ) عمر النصف $t_{1/2}$ للكربون-14 هو حوالي 5600 سنة. وعمر

النصف مرتبط مع احتمال اضمحلال الجُسَيم لكل وحدة زمن بالعلاقة $\lambda = \text{In}2/t_{½}$. ما هي λ للكربون-14؟

ب) إذا كان اضمحلال الكربون -14 يوصف بالتوزيع الاحتمالي الأسّي $p(t) = \lambda \exp(-\lambda t)$، فما هو متوسط التوزيع؟

الفصل التاسع

تحوّلات الكتلة ــ الطاقة

إن فكرة الطاقة المكمّمة التي قدّمناها في الفصل السابق نافعة للأجسام المتحركة بسرعات أقل بكثير من سرعة الضوء في الفراغ. وفي مثل هذا النظام اللانسبي، من الممكن معاملة المادة والطاقة ككميتين فيزيائيتين مختلفتين. وقد أدرك العلماء، على أيّ حال، بأن الأجسام المتحركة بسرعة قريبة من سرعة الضوء تخضع لمجموعة مختلفة من القوانين. وقد توجب توسيع النظرية الكمية إلى نطاق نسبي: وهو نطاق حيث يختفي فيه التمييز بين المادة والطاقة.

إن النظرية المقبولة على نطاق واسع لفيزياء الجُسَيمات الأولية هي النظرية الكمية النسبية، والنموذج المعياري لفيزياء الجُسَيمات الأولية هو نموذج الكوارك (Quark). ونموذج الكوارك هو المكافئ الحديث للنموذج الذري لديموقريطوس (Democritus). والمشاهدة الأساسية للنظرية الكمية النسبية هي أن الطاقة يمكن تحويلها إلى كتلة، والكتلة يمكن تحويلها إلى طاقة. وتعرّفنا على تحولات الكتلة ـ الطاقة في شرحنا للطاقة الشمسية. تتولّد الطاقة الشمسية بواسطة تحولات الكتلة ـ الطاقة التي تتم في التفاعلات الاندماجية النووية داخل النجم. وتحويل الكتلة إلى طاقة هي آلية مستمرة في النجوم،

والأسلحة النووية، والتفاعلات النووية. في هذا الفصل، سنكتسب معرفة أكثر تطوراً عن تحولات الكتلة ـ الطاقة والتفاعلات النووية وذلك من خلال تعرفنا على النظرية الكمية النسبية ونموذج الكوارك. نبدأ أولاً بمقدمة للنسبية.

1.9 نسبية إينشتاين

إن مفهوم النسبية كان موجوداً قبل نشر ألبرت إينشتاين لورقة بحثه الأولى حول النسبية في عام 1905 بوقت طويل. والنسبية تهتم في كيف أن حركة المشاهِد تؤثر على تقديره للعلاقات بين الكميات الفيزيائية. والفكرة بسيطة جداً.

لنفترض أننا نتحرك في مركبة فضائية بنصف سرعة الضوء بالنسبة ماكس (Max)، وهو مشاهِد لا يتحرك على الأرض. سرعة الضوء هي تقريباً 3×10^8 m/s. لنفترض الآن أننا نجلس إلى جوار بعضنا البعض في المركبة الفضائية. فما هي السرعة التي أتحرك بها أنا بالنسبة إليك؟ يمكنك الإجابة عن هذا السؤال ببساطة بالنظر إليّ ومن ثم تقرر ما إذا كانت المسافة بيننا تزداد، أو تقل، أو لا تتغير. إذا كانت المسافة بيننا لا تتغير، فهذا يعني أنني لا أتحرك بالنسبة إليك وسوف تقول بأن سرعتي هي صفر. إلا أن ماكس لا يوافق على ذلك.

بالنسبة إلى ماكس، نحن الاثنين نتحرك بنصف سرعة الضوء. فأيٌّ من المشاهدَين هو الصائب؟ كمية تحركي بالنسبة إليك تساوي صفراً، ولكن كمية تحركي بالنسبة إلى ماكس لا تساوي صفراً. فأيٌّ من كميتَي التحرك يجب استخدامها في قوانين نيوتن للحركة؟ إذا كانت النتائج التي نحصل عليها بتطبيق قوانين نيوتن للحركة تعتمد على حركة المشاهِد، فكيف يمكننا أن نقول بشكل قابل للتبرير بأن قوانين نيوتن صحيحة بشكل عام؟

يؤكد مبدأ النسبية أن قوانين الفيزياء يجب أن تعتمد على الحركة النسبية للمشاهدين. وقوانين الفيزياء تتحكم في العلاقات بين الكميات المقاسة ويجب أن تكون هي نفسها لجميع المشاهدين، حتى وإن كانت القيم العددية للكميات المقاسة مختلفة من مشاهد إلى آخر. فالقيم العددية تعتمد على الإطار المرجعي للمشاهد. ونعرّف الإطار المرجعي بأنه نظام الإحداثيات المستخدم لوصف نظام فيزيائي. ومبدأ النسبية يمثل وجهة نظر «ديمقراطية» لمختلف المشاهدين: أي إنه لا يشغل أيٌّ منّا إطاراً مرجعياً متميزاً. فالإطار المرجعي لأيّ شخص من حيث المبدأ مكافئ للإطار المرجعي لأيّ شخص آخر.

لنعد الآن إلى التصور الذي افترضناه: نحن نتحرك في مركبة فضائية بنصف سرعة الضوء بالنسبة لماكس، وهو مشاهِد لا يتحرك. لاحظ أن ماكس لا يتحرك بالاتفاق. ويمكننا ببساطة أن نفترض بأننا لا نتحرك وماكس يتحرك بنصف سرعة الضوء. فكِلا وجهتي النظر مقبولة من حيث المبدأ. ومن أجل هدفنا، فإنه من الأنسب جداً أن نتخيل بأن ماكس لا يتحرك.

لنفترض أن آليس (Alice) تقترب منّا في مركبة فضائية أخرى. سرعة آليس بالنسبة لماكس هي ثلثا سرعة الضوء. ووفقاً لتصور نيوتن للمكان والزمان، فإن ماكس يجب أن يشاهدنا نقترب من آليس بسرعة تفوق سرعة الضوء. فإذا قاس ماكس في الواقع السرعة التي نقترب فيها من آليس كما هو مشاهد من إطاره المرجعي الساكن، فإنه سيجد بأن سرعة اقتراب المركبتين سيكون أقل من سرعة الضوء. وبمعنى آخر، قياس ماكس لا يتوافق مع نظرية نيوتن. فهناك شيء ما يجب أن يكون خاطئاً!

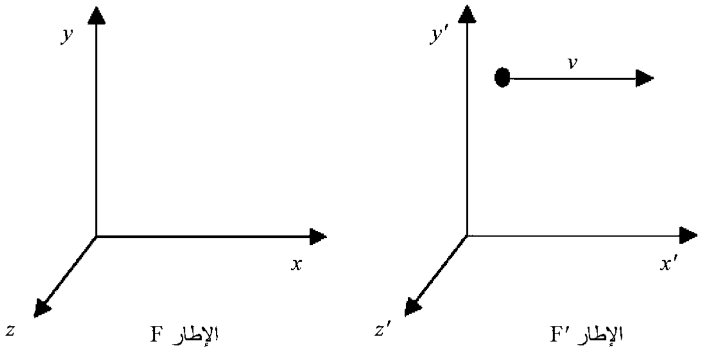
المشكلة تكمن في تصور نيوتن للمكان والزمان. اعتقد نيوتن

بأن المكان والزمان كميتان مطلقتان ومستقلتان. قام إينشتاين بحل هذه المشكلة عن طريق حل مشكلة أخرى : لماذا تكون قيمة سرعة الضوء مستقلة عن حركة المشاهد؟

لقد اكتشف العلماء بالتجارب بأن سرعة الضوء هي نفسها سواء أكنت تقيسها وأنت ساكن أو وأنت متحرك بأيّ سرعة لا تتجاوز سرعة الضوء. وفي الحقيقة، يبدو أنه من المستحيل فيزيائياً لأيّ جسم أن يتحرك بسرعة أكبر من سرعة الضوء. في بحثه المنشور في عام 1905 بعنوان **حول الديناميكية الكهربية للأجسام المتحركة** (*On the Electrodynamics of Moving Objects*) قدّم إينشتاين تفسيره لهذه الظاهرة فوق العادية.

قبل بحث إينشتاين لعام 1905، ابتكر الفيزيائيون مجموعة من القوانين لتحويل الوصف الديناميكي لجسم في إطار مرجعي متحرك بشكل منتظم (غير متسارع) إلى ذلك في إطار مرجعي آخر. ومجموعة القوانين هذه تسمى التحويل الإحداثي الغاليلي (Galilean Coordinate Transformation). وأبسط تعبير للتحويل الإحداثي الجاليلي يمكن الحصول عليه بافتراض الحركة النسبية للإطارين المرجعيين المبيّنين في الشكل (1.9). الإطار المرجعي F′ يتحرك بسرعة ثابتة v في الاتجاه x بالنسبة إلى الإطار المرجعي F. نقطتا الأصل للإطارين المرجعيين F′ وF هما عند $x=x'=0$ وعند الزمن $t=t'=0$. والتحويل الإحداثي الجاليلي هو :

$$\begin{aligned} x' &= x - vt \\ y' &= y \\ z' &= z \\ t' &= t \end{aligned} \qquad (9.1.1)$$



الشكل (1.9): الحركة النسبية

إن إحداثيات المكان *x’* تعتمد على قيمتي *x* و*t* في الإطار المرجعي F، بينما الإحداثيان الزمنيان *t* و*t’* متساويان. وتساوي *t* و*t’* يتطلب بأن لا يعتمد معدّل تغيّر الزمن المقاس بواسطة ساعتين في إطارين مرجعيين مختلفين على الحركة النسبية للإطارين المرجعيين. وتساوي *t* و*t’* يعبّر عن تصور نيوتن للزمن بأنه مطلق وثابت.

والتحويل الإحداثي الجاليلي لا يغيّر من شكل قوانين نيوتن، إلا أنه يغيّر من شكل معادلات ماكسويل. قياس سرعة الضوء بواسطة مايكلسون ومورلي (Michelson and Morley) أوضح بأن معادلات ماكسويل يجب ألا تعتمد على حركة المشاهِد القصوري. والمشاهد القصوري هو المشاهد الذي تكون حركته النسبية منتظمة، أو غير متسارعة، كما في الشكل (1.9). اقترح إينشتاين مجموعة جديدة من قوانين التحويل التي جعلت معادلات ماكسويل مستقلة عن الحركة المنتظمة للمشاهِد. وقوانين التحويل الجديدة هذه، المعروفة إجمالاً باسم تحويل لورينتز نسبة إلى مكتشفها، الفيزيائي الهولندي هينريك أنتون لورينتز (Henrik Anton Lorentz)، عرّفت الاعتماد المتبادل

بين إحداثيات المكان والزمن في الإطارين المرجعيين ’F وF.
العلاقة بين إحداثيات المكان والزمن في الإطارين المرجعيين ’F وF في الشكل (1.9) تعطى بتحويل لورينتز التالي:

$$x'=\frac{x-vt}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

$$y'=y$$

$$z'=z \qquad (9.1.2)$$

$$t'=\frac{t-x\frac{v}{c^2}}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

السرعة v هي سرعة الإطار المرجعي ’F المتحرك بالنسبة إلى الإطار المرجعي F مقاسة في الإطار المرجعي F. وخلافاً للمعادلة (9.1.1)، تبيّن المعادلة (9.1.2) بأن المكان والزمان يعتمدان على بعضهما البعض في الإطارين المرجعيين ’F وF كليهما. والمعادلة (9.1.1) يمكننا استنتاجها من المعادلة (9.1.2) بأخذ الحد C→∞.

رفض إينشتاين مفهوم «الزمن المطلق» وتبنى فكرة الزمن النسبي. والزمن، مثل المكان، كمية فيزيائية قابلة للقياس ولها قيمة عددية تعتمد على الإطار المرجعي للمشاهد. ووفقاً لنسبية إينشتاين، فإن الوصف الكامل لمسار حركة جسم يتطلب تحديد إحداثيات المكان والزمن لكل نقطة على طول المسار في الإطار المرجعي المعني. تكتب إحداثيات المكان والزمن على الشكل إحداثيات الزمكان في النسبية للتوضيح بأنهما لم يعودا متغيرين مستقلين. وأيّ نقطة على طول مسار جسم متحرك يشار إليها بأنها حدث وتعرّف بواسطة إحداثياتها للزمكان في الإطار المرجعي المعني.

مفاهيم نيوتن للمكان والزمان، على الرغم من أنها ما زالت نافعة عند السرعات الأقل بكثير من سرعة الضوء، إلا أنها لم تعد تعتبر أساسية. علاوة على ذلك، أصبحت هذه المفاهيم غير مجدية لتحديد فترة أيّ حدث دون تحديد الإطار المرجعي الذي تم فيه قياس الفترة. وبالتالي، فإن القول بأن حدثاً ما استمر ليوم واحد لا يفرق عن القول بأن نفس الحدث استمر مليون سنة إذا كان الإطار المرجعي للمشاهِد غير معروف.

وبالإضافة إلى استبدال مفهوم «الزمن المطلق» لنيوتن بالزمن النسبي، غيّر إينشتاين أيضاً فهم المجتمع الفيزيائي للتزامن. فقد أوضح إينشتاين بأنه يجب اعتبار فكرة التزامن على أنه مفهوم يعتمد على حركة المشاهِد. فأيّ حدثين يحدثان في وقت واحد في الإطار المرجعي A قد لا يحدثان في وقت واحد من وجهة نظر مشاهِد في الإطار المرجعي B المتحرك بالنسبة إلى الإطار المرجعي A. وبالتالي، وكمثال بسيط، إذا نظرنا إلى غطاء المحرك وغطاء الصندوق لسيارتنا المتحركة يفتحان فجأة في وقت واحد، فإن المشاهِد الواقف على الأرض قد يدّعي وبشكل صائب بأن غطاء الصندوق فتح قبل غطاء المحرك. هذا الاعتماد للتزامن على حركة المشاهِد يصبح هاماً فقط للسرعات المقترنة بسرعة الضوء؛ فإن أفكار نيوتن تكون مقبولة كحالة خاصة من مفهوم التزامن العام لإينشتاين.

تعرَف النظرية التي قدّمها إينشتاين في بحثه في عام 1905 اليوم بالنظرية الخاصة للنسبية. تهتم هذه النظرية بالأطر المرجعية المتحركة بشكل منتظم بالنسبة إلى أطر مرجعية أخرى . وهذه الأطر المرجعية المتحركة بشكل منتظم تعرّف بالأطر المرجعية غير المتسارعة، أو القصورية. وكجزء من النظرية النسبية، أوضح إينشتاين بأن الكتلة

والطاقة ليسا سوى مظهرين مختلفين لنفس الكمية الفيزيائية. وتكافؤ الكتلة والطاقة هو الأساس الذي تقوم عليه صناعة الطاقة النووية والأسلحة النووية.

كان إينشتاين غير قادر على تقديم نظرية نسبية في عام 1905 لأطر مرجعية تتسارع بالنسبة إلى بعضها البعض. بعد اثنتي عشرة سنة، في عام 1917، نشر إينشتاين نظرية نسبية للتعامل مع الأطر المرجعية المتسارعة. هذه النظرية تسمى النظرية العامة للنسبية. والنظرية العامة تنطبق على مدى واسع من الأنظمة المرجعية.

إن النظرية الخاصة للنسبية مقبولة بشكل واسع، بينما النظرية العامة ما زالت تعتبر في مرحلة التحقق. وهناك الكثير من الأدلة التجريبية المتوفرة لدعم النظرية الخاصة أكثر من تلك للنظرية العامة. والاختبارات التجريبية للنظرية العامة ناجحة، إلا أنها أقل عدداً وإنجازاً من تلك للنظرية الخاصة. وعلى الرغم من أن الاختبارات التجريبية للنظرية العامة ليست نهائية بعد، إلا أن معظم الفيزيائيين يوافق على مبادئ النظرية العامة، وخصوصاً عند تطبيقها على أنظمة عيانية مثل حركة الأجرام السماوية، لأن كلاً من النظرية الخاصة والنظرية العامة قد فسّرتا بنجاح البيانات والظواهر التي لم يكن بالإمكان تفسيرها بشكل مقنع باستخدام النظريات البديلة. وتقدّم النظرية العامة تفسيراً هندسياً لتفاعلات الجاذبية وتتنبأ، ضمن أشياء أخرى ، بوجود الثقوب السوداء (نجوم ضخمة منهارة) ونشأة الكون.

إن الفرضيات المختلفة المتعلقة بنشأة الكون تؤدّي إلى تنبؤات رياضية مختلفة للسلوك الفيزيائي. وكل مجموعة من الفرضيات والنتائج المشتقة من النظرية العامة للنسبية لتلك المجموعة من الفرضيات يمكن اعتبارها نموذجاً كونياً. وتحديد أيّ نموذج كوني هو

المدعوم بالدليل الفيزيائي يوفر وسيلة لاختبار صحة الفرضيات التي تقع تحت كل نموذج كوني ويقدّم تصوراً في أصل مصادر الطاقة الهامة، كما سنناقشه لاحقاً بالتفصيل.

2.9 اللاتغيُّرية، والتماثل، والنسبية

تحتوي النظريات الفيزيائية على شكلية رياضية بمجموعة من القوانين وذلك لربط الكميات والعمليات الرياضية بالكميات والقياسات الفيزيائية. والعلاقات التي تربط بين بيانات القياسات يتم وصفها بمعادلات. وأحد التصورات لتكوين الشكلية الرياضية هو تحديد كيفية سلوك المتغيرات الفيزيائية عند مشاهدتها من أطر مرجعية مختلفة. مبدأ النسبية يقول بأن العلاقات بين الكميات الفيزيائية الهامة يجب أن تبقى لامتغيرة بالنسبة إلى التحويلات بين الأطر المرجعية المختلفة.

إن متطلبات اللاتغيُّرية في النسبية يمكن تمثيلها رياضياً كتحويلات بين الأنظمة الإحداثية. والأشياء الرياضية التي تمثل التحويلات الإحداثية هي المجموعات. والمجموعة عبارة عن مجموعة غير فارغة G من العناصر ولها الخصائص التالية:

● العنصران a وb للمجموعة G يمكن أن يشكّلا عنصراً جديداً c للمجموعة G من العملية الثنائية $c = ab$. والجمع والضرب مثالان على العملية الثنائية.

● عناصر المجموعة G تخضع لقانون التجميع $(ab)c = a(bc)$.

● تحتوي المجموعة G على خاصية عنصرية e تحقق التساوي $ac = ca = a$ لكل عنصر في G.

● تحتوي المجموعة G على عنصر مقلوب a^{-1} لكل عنصر a في المجموعة.

كمثال، نفترض أن العملية الثنائية هي ضرب والمجموعة G هي مجموعة جميع الأعداد الحقيقية الموجبة اللاصفرية. في هذه الحالة، فإن G هي مجموعة بخاصية عنصرية 1 والمقلوب a^{-1} هو $1/a$. نظرية المجموعة هي المجال الرياضي الذي يُستخدم لوصف التناسق في الطبيعة[1].

تتضمن التحويلات الإحداثية دورانات ثلاثية البعد وانتقال في الفراغ الإقليدي. والانتقال في سياق التحويلات الإحداثية يشير إلى المسافة الفاصلة بين نقاط الأصل للأطر المرجعية. ومن أجل هدفنا، فإن الفراغ الإقليدي هو الفراغ الثلاثي الأبعاد بحيث إن طول المتجه π يعطى بالعلاقة:

$$r^2 = (x^1)^2 + (x^2)^2 + (x^3)^2 \qquad (9.2.1)$$

والإحداثيات الديكارتية للمركّبات x، y، z ممثلة بالرموز x^1، x^2، x^3 على التوالي. ويكتب الدليل كحرف فوقي للاتفاق مع الترميز المعقد في المؤلفات العلمية الحديثة. وكمرجع مستقبلي، من الأفضل كتابة هذه المعادلة على الصورة التالية:

$$r^2 = \sum_{i=1}^{3} \sum_{j=1}^{3} g_{ij} x^i x^j \quad \text{لكل} \quad i, j = 1,2,3 \qquad (9.2.2)$$

حيث المعامل $g_{ij} = 1$ إذا كانت $i = j$، و$g_{ij} = 0$ إذا كانت $i \neq j$. ومجموعة المعاملات $\{g_{ij}\}$ تسمى المعاملات المترية ويمكن كتابتها على شكل مصفوفة كالتالي:

$$[g_{ij}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (9.2.3)$$

تصف المجموعة الإقليدية دورانات وانتقالات في الفراغ الإقليدي. والمجموعة الإقليدية تحقق متطلب نسبية غاليليو: معادلات الفيزياء يجب أن تكون هي نفسها لمشاهدَين في سكون بالنسبة إلى

بعضهما الآخر. والمعادلات التي هي لامتغيرة بالنسبة إلى نسبية غاليليو ليست من الضرورة أن تكون لامتغيرة إذا كان المشاهدان يتحركان بالنسبة إلى بعضهما الآخر. وإذا أردنا أن تكون معادلات الفيزياء صالحة سواء كنّا واقفين على الأرض، أو مسافرين في البحر، أو متحركين خلال الفضاء، فإن المجموعة الإقليدية ونسبية غاليليو مقيدان جداً.

إينشتاين والنسبية

إن مبدأ إينشتاين للنسبية هو امتداد لنسبية غاليليو من خلال متطلبه بأن معادلات الفيزياء تكون لامتغيرة للمشاهدين القصوريين الذين هم في حركة نسبية. والمشاهد القصوري هو مشاهد في إطار مرجعي غير متسارع. وتتطلب النسبة الخاصة بأن يقيس المشاهدان القصوريان الذين هم في أطر مرجعية متكافئة نفس سرعة الضوء المنتشر في الفراغ. والإحداثيات في النظرية النسبية الخاصة لم تعد معرّفة كمركّبات في الفراغ الإقليدي وكزمن مطلق، ولكنها تُعرّف كمركّبات رباعية البعد للزمكان تسمى زمكان مينكوسكي (Minkowski space-time). وطول المتجه الرباعي $\{s\} = \{x^0, x^1, x^2, x^3\}$ في زمكان مينكوسكي هو:

$$s^2 = \sum_{\mu=0}^{3} \sum_{\nu=0}^{3} g_{\mu\nu} x^\mu x^\nu \quad \text{لكل} \quad \mu, \nu = 0, 1, 2, 3 \qquad (9.2.4)$$

بالمعامل المتري:

$$[g_{\mu\nu}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \qquad (9.2.5)$$

المركّبة الصفرية للمتجه الرباعي (Four-Vector) للزمكان هي إحداثية الزمن $x^o = ct$، حيث c سرعة الضوء في الفراغ، والمركّبات

الثلاثة الباقية تمثل إحداثيات المكان الثلاثة. وطول المتجه الرباعي للزمكان هو:

$$\begin{aligned} s^2 &= (x^0)^2 - (x^1)^2 - (x^2)^2 - (x^3)^2 \\ &= c^2t^2 - (x^1)^2 - (x^2)^2 - (x^3)^2 \end{aligned} \tag{9.2.6}$$

يُسمّى المتجه الرباعي شبه زمن (Timelike) إذا $S^2 > 0$ ويُسمّى شبه مكان (Spacelike) إذا $S^2 < 0$. وإذا كان الجسم يتحرك بسرعة الضوء، فإن طول المتجه الرباعي للزمكان هو $S^2 = 0$.

المتجه الرباعي للطاقة ـ كمية التحرك

هناك متجه رباعي آخر له أهمية خاصة وهو المتجه الرباعي للطاقة ـ كمية التحرك $\{p^u\} = \{p^0, p^1, p^2, p^3\} = \{\frac{E}{C}, p^1, p^2, p^3\}$. المركّبة الصفرية للمتجه الرباعي للطاقة ـ كمية التحرك هي الطاقة الكلية E مقسومة على سرعة الضوء في الفراغ. والمركّبات الثلاثة الباقية المكانية هي مركبات متجه كمية التحرك. وطول المتجه الرباعي للطاقة ـ كمية التحرك لجُسَيم نسبي كتلته m يعطى بالعلاقة (9.2.4) مع استبدال المتجه الرباعي للزمكان بالمتجه الرباعي للطاقة ـ كمية التحرك، أي إن:

$$\begin{aligned} m^2c^2 &= (p^0)^2 - (p^1)^2 - (p^2)^2 - (p^3)^2 \\ &= \frac{E^2}{c^2} - (p^1)^2 - (p^2)^2 - (p^3)^2 \end{aligned} \tag{9.2.7}$$

يُسمّى المتجه الرباعي شبه زمن إذا كانت $m^2c^2 > 0$ ويُسمّى شبه مكان إذا كانت $m^2c^2 < 0$. والجسم المتحرك بسرعة أقل من سرعة الضوء يُسمّى براديون (Bradyon) وله كتلة موجبة. ومن الممكن رياضياً لجسم أن يتحرك بسرعة أكبر من سرعة الضوء. والجسم الأسرع من الضوء يُسمّى تاكيون (Tachyon). وفي سياق النسبية

الخاصة الكلاسيكية المعطاة بالمعادلة (9.2.7)، فإن كتلة الجسم الأسرع من الضوء سوف تكون تخيلية، وهي نتيجة ليست فيزيائية. وهناك طرق للتعامل مع التاكيونات، إلا أن مناقشة ذلك هو خارج نطاق هذا الكتاب[2]. وإذا كان الجسم يتحرك بسرعة الضوء، فإن طول المتجه الرباعي للزمكان هو $m^2c^2=0$.

يمكن إعادة ترتيب المعادلة (7.2.9) لحساب الطاقة الكلية من الكتلة وكمية التحرك كالتالي:

$$E^2 = m^2c^4 + (p^1)^2c^2 + (p^2)^2c^2 + (p^3)^2c^2 \qquad (9.2.8)$$

إذا كانت كمية التحرك مهملة مقارنة بالكتلة، تؤول المعادلة (8.2.9) إلى النتيجة التالية المشهورة:

$$E \approx mc^2 \qquad (9.2.9)$$

وإذا كان إطارنا المرجعي يتحرك مع الجسم، فإن الجسم سيكون ساكناً وتصبح المعادلة (9.2.9) التساوي التالي:

$$E = mc^2 = m_0c^2 \qquad (9.2.10)$$

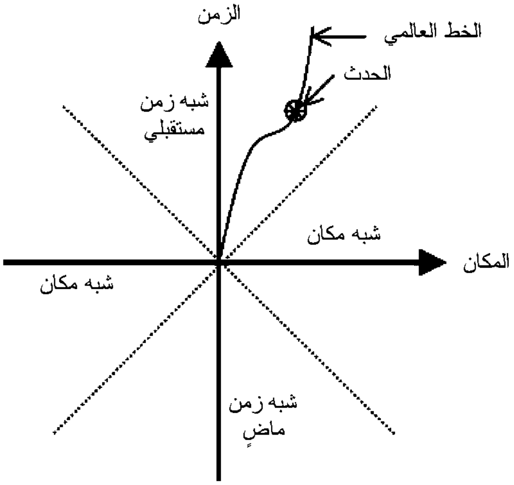
حيث m_0 تسمى كتلة السكون للجسم.

إن المعادلة (9.2.9) هي أساس مشاهدة أن الجسم يمكن تحويله إلى طاقة، والعكس صحيح. وهذه المشاهدة استغلت للاستخدام في توليد الطاقة النووية، وسنناقش ذلك بالتفصيل لاحقاً.

3.9 توضيح من فيزياء الجُسَيمات

لتوضيح الفكرة المقدمة في القسم السابق، دعنا نفترض تطبيقاً من الطرق العلمية على تجربة لفيزياء الجُسَيمات. والغرض من هذه التجربة هو تتبع حركة جُسَيم، إلكترون مثلاً، في الفراغ والزمن. واهتمامنا بشكل خاص سيكون قياس الخط العالمي (World-Line) للإلكترون. وهذا يتطلب بعض التوضيح.

إن ساحة الطبيعة هي رباعية البعد. ثلاثة أبعاد منها فراغية (الارتفاع، والطول، والعرض)، والبعد الرابع هو الزمن. الطول هو أحد الأبعاد، والمساحة أو السطح تتطلب بعدين، والحجم الذي يشغله هذا الكتاب يتطلب ثلاثة أبعاد، ونشوء جسم ثلاثي البعد يتم في بُعد الزمن. ولأنه من الصعب رسم أشكال رباعية البعد على صفحات ثنائية البعد، فإننا نرسم غالباً أشكالاً ثنائية البعد فيها أحد البعدين هو الزمن والآخر هو البعد الفراغي (المكاني). نقطة تقاطع محوري المكان والزمن تمثل الزمن والموقع الحالي لجسم مثل الإلكترون. يبيّن الشكل (2.9) رسماً بيانياً بين المكان والزمن.



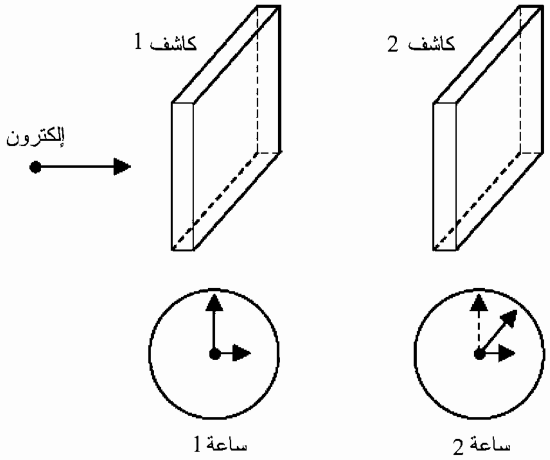
الشكل (2.9): الأحداث، والخطوط العالمية، ومخروط الضوء

لنفترض أننا نريد تتبع حركة إلكترون في بعد فراغي واحد. ويمكن للإلكترون أن يتحرك إلى الأمام، أو إلى الخلف، أو لا يتحرك إطلاقاً. فإذا كان الإلكترون لا يتحرك إطلاقاً مع مرور الزمن، فإننا نتتبع «الحركة الزمنية» للإلكترون على المحور الرأسي نحو

الأعلى . وسنتتبع حركة الإلكترون على المحور الرأسي نحو الأسفل إذا كان الإلكترون يتحرك في الماضي. والخطوط التي قد تتبعناها تسمى خطوطاً عالمية. هذه الخطوط تمثل حركة الإلكترون خلال المكان والزمن. وكل نقطة على الخط العالمي تسمّى حدث (Event). وبالتالي فإن الموقع والزمن الحالي للإلكترون، نقطة الأصل في الرسم البياني بين المكان والزمن، هي حدث على الخط العالمي للإلكترون. وهذه المصطلحات موضحة في الشكل (2.9) لإلكترون يتحرك بعيداً عن موقعه الأصلي مع مرور الزمن في المستقبل. والخطوط المتقطعة في الشكل (2.9) تدل على الخط العالمي لجسم يتحرك بسرعة الضوء. إن المساحة المحصورة بواسطة الخطوط المتقطعة في المستقبل والماضي تشبه المخروط وبالتالي فهي تعرف بمخروط الضوء (Light Cone).

كان ألبرت إينشتاين الرائد في تحريم أي جسم كتلي مثل الإلكترون من الدخول إلى المناطق الموضحة بشبه المكان في الرسم البياني بين المكان والزمن. لدخول هذه المناطق، يجب على الجسم أن يتحرك بسرعة أكبر من سرعة الضوء. وحيث إن إينشتاين افترض بأنه لا يمكن لأي جسم أن تفوق سرعته سرعة الضوء، فإن قياس الخط العالمي للإلكترون يمكن أن يختبر نظرية إينشتاين. فإذا غادر الإلكترون مخروط الضوء، والذي هو محرم بالاستنتاجات الرسمية باستخدام فرضيات إينشتاين، فإن الشك سيقع على نظريته.

لنفترض أننا أنشأنا نظاماً للكشف يتكون من كاشفين وساعتين كما في الشكل (3.9). الكاشفان 1 و2 يقيسان موقع الإلكترون على طول محور المكان. والساعتان 1 و2 تقيسان الزمن عندما يمر الإلكترون خلال الكاشفين 1 و2 على التوالي.

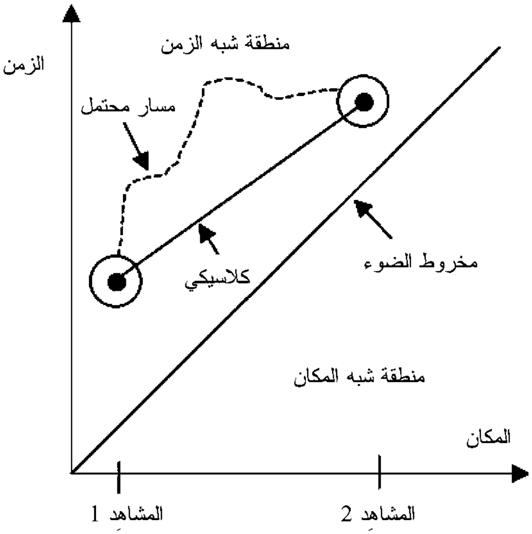


الشكل (3.9): قياس الخط العالمي للإلكترون

جميع قياسات الموقع والزمن غير يقينية إلى حد ما. وعلى الرغم من صغرها، فإن الكاشفين لهما عرض محدد يحجب الموقع الدقيق للإلكترون. والساعتان يمكن قراءتهما بدقة ولكن ليس بالضبط. ومن المهم أن ندرك بأن مصادر عدم اليقين دائماً ما تكون موجودة في القياسات الفيزيائية. وللتقليل من آثار عدم اليقين، نكرر القياسات مرات عديدة. ونأخذ متوسط النتائج للحصول على نتائج موثوق بها، حيث «موثوق بها» تعني ببساطة أن القيم النهائية المستخدمة لتتبع الخط العالمي للإلكترون قابلة للإنتاج ضمن عدم يقين معتمد.

إن النقطتين الدائريتين في الشكل (4.9) تبيّنان متوسط قيم قياساتنا. وحجم كل دائرة يمثل عدم اليقين، أي إن الدائرة الأكبر تمثل عدم اليقين الأكبر. يُرسم خط مستقيم بين القياسين، وأشرنا إليه بـ «كلاسيكي» في الشكل (4.9). وهذا هو أبسط خط عالمي يمكننا رسمه للإلكترون. ومن المحتمل أن يكون الإلكترون قد أخذ مساراً

غير مباشر ممثل بالخطوط المتقطعة، إلا أن الاحتمال الأكبر هو المسار الكلاسيكي. وقد تعلمنا من صياغة تكامل المسار لميكانيكا الكم اللانسبية بأن جميع المسارات في ما عدا المسار الكلاسيكي تؤدي دوراً هاماً في النظرة العلمية الحديثة للطبيعة. وحالياً، يكفي أن نفترض فقط المسار المستقيم. بهذا الافتراض، فإننا نستنتج أن قياسنا للخط العالمي للإلكترون يدعم نظرية إينشتاين لأن الخط العالمي باقي ضمن مخروط الضوء.



الشكل (4.9): الخط العالمي للإلكترون على الرسم البياني بين المكان والزمن

وإذا توسط الخط العالمي منطقة «شبه المكان» في الرسم البياني بين المكان والزمن، فإن تجربتنا سوف لن تدعم نظرية إينشتاين. وقبل رفض النظرية، على أيّ حال، يجب أولاً أن نفحص إعدادات تجربتنا مع الخطوات وذلك للتأكد من عدم وجود عوامل خارجية. وبعد التأكد من سمات جاهزية التشغيل للتجربة وعدم وجود أيّ

أخطاء، نقوم بالتحقق من الخطوات الشكلية المستخدمة لإنشاء مخروط الضوء. إذا لم نجد أيّ أخطاء مرة أخرى ، فإن موردنا الوحيد هو مراجعة النظرية. وهذا يمكن إجراؤه بتعديل الفرضية الأصلية أو البدء بفرضية جديدة تماماً. والتقدم العلمي يتم عندما تفسر النظرية الجديدة جميع الظواهر التي تم تفسيرها بواسطة النظرية القديمة، وتقدّم تفسيراً للمشاهدات غير المفسرة، وتعمل توقعات تجريبية قابلة للفحص.

من وجهة نظر ميكانيكا الكم، فإن تجربة الخط العالمي مصممة لقياس الخط العالمي لإلكترون من خلال قياس نقطتين، أو حدثين، على طول الخط العالمي. مسار الإلكترون بين الحدين غير معروف. وهناك إمكانية لوجود مسارات عديدة بين الحدثين. ولكل مسار، تتيح لنا النظرية الكمية حساب الاحتمال بأن الإلكترون قد يأخذ ذلك المسار. فإذا كانت هناك عشرة مسارات ممكنة، وكل مسار محتمل بالتساوي، عندئذ فإن هناك احتمالاً واحداً في العشرة بأن الإلكترون سيأخذ أيّاً من المسارات العشرة الذي يمكننا اختياره. وفي معظم الأحوال فإن المسارات ليست متساوية من الناحية الاحتمالية ـ أي إن مساراً واحداً يكون أكثر احتمالاً من المسارات الأخرى . والمسار الأكثر احتمالاً هو المسار المحدد بواسطة النظرية الكلاسيكية. وعلى الرغم من أن النظرية الكلاسيكية تخبرنا أيّ المسارات هو الأكثر احتمالاً، فإنها لا تعطي تفسيراً لمسارات بديلة. والنظرية الكمية تأخذ في الاعتبار جميع المسارات الممكنة وتعطي توضيحاً عن احتمال كل مسار.

4.9 التشتت

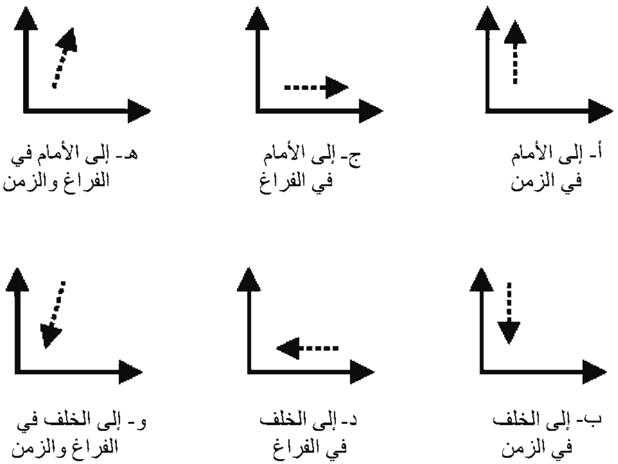
إن معظم ما نعرفه عن العالم دون المجهري قد تم تقديره من تحليل تجارب تشتت الجُسَيمات. والتشتت في الواقع مفهوم بسيط

جداً وله أمثلة يومية عديدة. وأحد الأمثلة المعروفة هو حالة الكرة التي تصطدم بمضرب. فالتصادم بين الكرة والمضرب يؤدّي إلى تغيّر في الاتجاه الابتدائي للكرة. ومن الممكن أيضاً إرجاع الكرة على طول مسارها الأصلي. هذا التغير في اتجاه حركة الجسم نتيجة التفاعل أو التصادم مع جسم آخر هو مثال للتشتت. والمثال الآخر هو عملية التشتت الفلكي، ويحدث عندما يمر نيزك بالقرب من الأرض دون أن يتم أسْره بواسطة جذب الجاذبية الأرضية له. ويتغيّر مسار النيزك من خلال تأثير مجال الجاذبية الأرضية له.

والجُسَيمات دون المجهرية غالباً ما تسلك بنفس السلوك المشابه لنظام التشتت بين النيزك والأرض. وعلى الرغم من وجود تفاعل الجاذبية أيضاً عندما يتفاعل جُسَيمان كتليان دون مجهريين مع بعضهما البعض، إلا أن الجاذبية عادة ليست التفاعل السائد بينهما. هناك ثلاثة تفاعلات أخرى يمكن أن توجد عند حدوث التشتت للجُسَيمات دون المجهرية. هذه التفاعلات هي التفاعلات القوية، والكهرومغناطيسية، والضعيفة. سنناقش هذه التفاعلات لاحقاً بالتفصيل.

يمكن أن تكون عمليات التشتّت معقدة جداً. ولفهم العوامل المشتركة بشكل أفضل في أيّ عملية تشتّت معينة، نأخذ الرسم البياني بين المكان والزمن. الزمن مرسوم على طول المحور الرأسي والبعد المكاني مرسوم على طول المحور الأفقي. وتصور الأسهم مسارات الجُسَيمات. يبيّن الشكل (5.9) بعض الحالات البسيطة. الحالة (أ) هي مثال نموذجي لجسم غير متحرك مع مرور الزمن. والحالة (ب) هي لنفس الجسم مع مرور الزمن بالعكس. والحالتان (ج) و(د) تمثلان جسماً يتحرك إلى الأمام وإلى الخلف في الفراغ دون أيّ مرور للزمن. وحتى يومنا هذا، لا توجد ظاهرة فيزيائية

معروفة لها خصائص الحالتين (ج) و(د). والحالتان (هـ) و(و) يُشاهدان بشكل روتيني في تجارب التشتت. تبيّن الحالة (هـ) جُسَيماً يتحرك إلى الأمام في الفراغ والزمن وهي حالة مألوفة من الحياة اليومية. والحالة (و)، من ناحية أخرى ، ليست مألوفة من الحياة اليومية لأنها تبيّن جُسَيماً يتحرك إلى الخلف في الفراغ والزمن.



الشكل (5.9): رسوم بيانية بين المكان والزمن

إمكانية التحرك إلى الخلف في الزمن هي نتيجة فيزيائية للعلاقة النسبية بين الكتلة والطاقة لجُسَيم حر كتلته m، وطاقته E، ومقدار كمية تحركه p، أي إن:

$$m^2c^4 = E^2 - p^2c^2 \tag{9.4.1}$$

بحل هذه المعادلة من أجل الطاقة نحصل على :

$$E = \pm\sqrt{m^2c^4 + p^2c^2} \tag{9.4.2}$$

إن الطاقة يمكن أن تكون موجبة أو سالبة. والجُسَيم يمكن أن

يكون إما في حالة طاقة موجبة أو في حالة طاقة سالبة. والجُسَيم في حالة الطاقة السالبة يمكن تفسيره بأنه جُسَيم في حالة طاقة موجبة يتحرك إلى الخلف في الزمن. هذا التفسير، الذي اقترحه ستوكلبرغ وريتشارد فينمان (E.C.G. Stueckelberg and Richard Feynman) [فانشي، 1993؛ وواينبر، 1995]، يعتبر مقبولاً لأن سعة الاحتمال لحركة جُسَيم حر نسبي تتضمن حاصل ضرب الطاقة E في إحداثيات الزمن $x^o = ct$. وحاصل الضرب Ex^o يكون سالباً إما إذا كانت $E < O$، $x^o > O$ أو $E > O$، $x^o < O$.

وهناك ملاحظة أخرى يجب ذكرها عن المعادلة (9.4.1). تبيّن المعادلة (9.4.1) بأن الكتلة هي المفهوم المستنتَج: يتم حساب الكتلة من الطاقة وكمية التحرك. وعلى العكس من ذلك، فإن المعادلة (9.4.2) تبيّن بأن الطاقة هي المفهوم المستنتَج: يتم حساب الطاقة من الكتلة وكمية التحرك. وفي الواقع، فإن كتلة الجُسَيم لا تقاس، ولكن يتم استنتاجها من قياسات الطاقة في المسعّرات الحرارية وكمية التحرك من تتبع الجُسَيم. هذه الكتل المستنتجة ليست قياسات أساسية لأنها تعتمد على النظرية المستخدمة لتأسيس علاقة بين الطاقة وكمية التحرك، وفي هذه الحالة فإن النسبية الخاصة هي النظرية الواقعة تحت المعادلة (9.4.1). فإذا افترضنا أن الجُسَيم كان لانسبياً بحيث إن $m^2c^4 >> p^2c^2$، وكنا فقط مهتمين بالقيم الموجبة للطاقة، بالتالي فإن المعادلة (2.4.9) سوف تصبح على النحو الآتي:

$$E = \sqrt{m^2c^4 + p^2c^2} = mc^2\sqrt{1 + \frac{p^2c^2}{m^2c^4}} \approx mc^2 + \frac{p^2}{2m} \qquad (9.4.3)$$

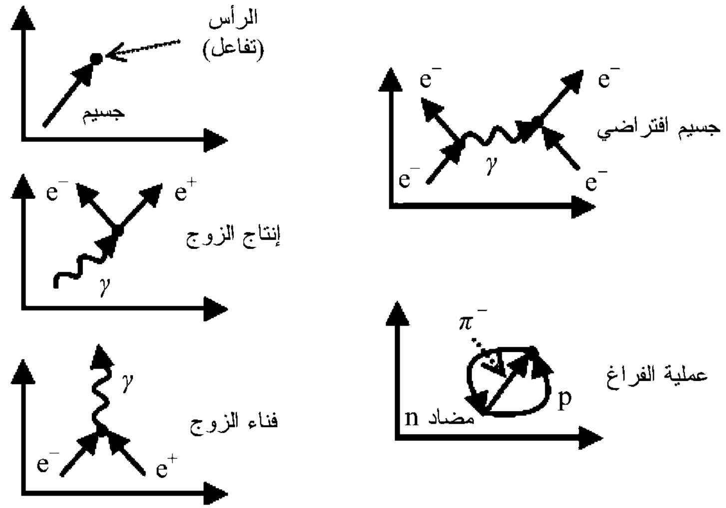
وتبيّن المعادلة (9.4.3) بأن الطاقة الكلية للجُسَيم الحر اللانسبي ذي الطاقة الموجبة تساوي مجموع الطاقة الناتجة من كتلة الجُسَيم وطاقة حركة الجُسَيم.

على الرغم من أن تجارب التشتت تدرس سلوك الأنظمة دون المجهرية الصغيرة جداً، إلا أن الأجهزة المطلوبة لإجراء هذه التجارب غالباً ما تكون ضخمة وباهظة الثمن. الوظيفة الأساسية لأجهزة التشتت هي توجيه حزمة متوازية من الجُسَيمات إما إلى مادة مستهدفة ساكنة أو إلى حزمة أخرى من الجُسَيمات. ومن الضروري عادة تعجيل حزمة الجُسَيمات الساقطة حتى تصل الجُسَيمات إلى السرعة المطلوبة. ولهذا السبب فإن الأجهزة التي يتم إنشاؤها لإجراء تجارب تشتت الجُسَيم تسمى معجلات الجُسَيم (Particle Accelerator). ولتبرير تكلفتها العالية مقارنة بالأنواع الأخرى من التجارب، فإن معجلات الجُسَيم وكاشفات الجُسَيم المرافقة لها تعتبر قيّمة في دراسة العديد من العمليات الطبيعية الأساسية، وتطويرها قد أدى إلى تقنية الانبثاق (Spin-Off) في المجالات التجارية الهامة مثل صناعة المغناطيس وفائقية التوصيل (Superconductivity).

يبيّن الشكل (6.9) بعض الأمثلة على العمليات والتفاعلات التي تم مشاهدتها خلال تجارب التشتت. الرسوم البيانية بين المكان والزمن التي توضح عمليات التشتت تعرف برسوم فينمان البيانية تكريماً لمنشئها، الفيزيائي الأميركي ريتشارد فينمان. الرسم البياني العلوي يوضح الترميز والعلامات. مرة أخرى ، يمثل السهم حركة الجُسَيم في المكان والزمن. والنقطة، أو الرأس، تشير إلى الحدث في المكان والزمن عندما يحدث تفاعل بين جُسَيمين أو أكثر.

إنتاج الزوج (Pair Production) وفناء الزوج (Pair Annihilation) موضحان في الرسمين البيانيين الثاني والثالث في الشكل (6.9). الخط المتموج يدل على الفوتون γ، أو جُسَيم الضوء. الرمزان e^- وe^+ يدلان على الإلكترون والجُسَيم المضاد له، البوزيترون (Positron)، على التوالي. إنتاج الزوج هي العملية التي

يتم فيها تخليق الجُسَيم والجُسَيم المضاد له عندما تتوفر طاقة كافية. والطاقة تأخذ شكل الأشعة الكهرومغناطيسية في عملية إنتاج الزوج. وعلى العكس من ذلك، فالجُسَيم والجُسَيم المضاد قد يفني كل منهما الآخر في عملية فناء الزوج. وتتحول طاقة زوج الجُسَيم والجُسَيم المضاد إلى أشعة كهرومغناطيسية بعد التشتت.

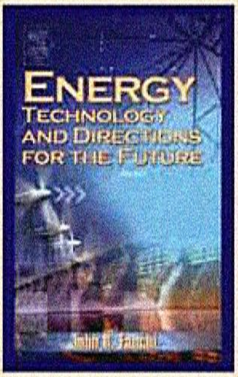


الشكل (6.9): مثال لرسوم فينمان البيانية لعمليات التشتت

إن الرسم البياني «للجُسَيم الافتراضي» في الشكل (6.9) يبيّن ما يمكن أن يحدث عندما يمر إلكترونين بجوار بعضهما الآخر. ببساطة، نقول بأن الإلكترونين يتنافران لأن لهما نفس الشحنة الكهربائية. وهذا التنافر قد تم تكوينه بتجارب لا تُحصى . وبشكل أساسي، وحديث، نقول بأن الإلكترونين يتبادلان الفوتون، أو جُسَيم الضوء. والفوتون يتواجد فقط لفترة قصيرة جداً ويُسمّى جُسَيم افتراضي (Virtual Particle). والفترة التي يتواجد فيها الجُسَيم الافتراضي يتم التحكم بها بواسطة مبدأ عدم اليقين للطاقة والزمن التالية:

الطاقة

التقنية والتوجهات للمستقبل(*)



(*) الكتاب الثالث من الطاقة

السلسلة: تضم هذه السلسلة ترجمة لأحدث الكتب عن التقنيات التي يحتاج إليها الوطن العربي في البحث والتطوير ونقل المعرفة إلى القارئ العربي.

الكتاب: يقدم الكتاب مناقشة جادة في أسس إنتاج الطاقة وخياراتها للقرن الحادي والعشرين حينما تصبح مصادر الطاقة القديمة ناضبة أو تكاد، كما يوفر للمهندسين والعلماء وأساتذة الهندسة وطلابها أسساً معرفية قيمة وموسعة حول استخدام معايير الأكاديمية الوطنية العلمية الأميركية بهذا الخصوص.

وعلى عكس معظم كتب الطاقة المتوفرة حالياً يتطلب العرض الذي يقدمه كتابنا الحالي من متلقيه أن يكونوا قد أنهوا مرحلة جامعية في مجال الفيزياء والرياضيات وحساب التكامل والتفاضل.

المؤلف: جون ر. فانشي: بروفيسور هندسة النفط في جامعة كولورادو، مستشار لعدد من شركات الطاقة حول العالم.

المترجم: عبد الباسط علي صالح كرمان: دكتوراه في الفلسفة من جامعة تكساس - دالاس (1995)، أستاذ مشارك في قسم الفيزياء - كلية العلوم، جامعة صنعاء.

سلسلة كتب التقنيات الإستراتيجية والمتقدمة

1. المياه
2. البترول والغاز
3. البتروكيمياء
4. النانو
5. التقنية الحيوية
6. تقنية المعلومات
7. الإلكترونيات والاتصالات والضوئيات
8. الفضاء والطيران
9. الطاقة
10. المواد المتقدمة
11. البيئة

الطاقة
التقنية والتوجهات للمستقبل
جون ر. فانشي
(9 - 3)

المنظمة العربية للترجمة
مدينة الملك عبدالعزيز للعلوم والتقنية KACST

ISBN 978-9953-0-1931-4

الثمن: 35 دولاراً
أو ما يعادلها